

Doelopsporing met PHARUS

TNO Fysisch en Elektronisch
Laboratorium

Oude Waalsdorperweg 63
Postbus 96864
2509 JG 's-Gravenhage

Telefoon 070 374 00 00
Fax 070 328 09 61

Datum
juni 1998

Auteur(s)
Ing. R.J. Dekker
Drs. J.S. Groot

Opdrachtgever
Projectbegeleider
Onderdeel

HWO-CO
Ir. J.B.J. Orbons
DS/CZ-D

Rubricering
Vastgesteld door
Vastgesteld d.d.

Ir. J.B.J. Orbons
12 juni 1998

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht van het ministerie van Defensie werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van de opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de 'Modelvoorwaarden voor Onderzoeks- en Ontwikkelings-opdrachten' (MVDT 1997) tussen de minister van Defensie en TNO indien deze op de opdracht van toepassing zijn verklaard dan wel de betreffende ter zake tussen partijen gesloten overeenkomst.

Titel
Managementuitreksel
Samenvatting
Rapporttekst
Bijlagen A - C

Ongerubriceerd
Ongerubriceerd
Ongerubriceerd
Ongerubriceerd
Ongerubriceerd

Exemplaar(n).
Oplage
Aantal pagina's
Aantal bijlagen

12
47
60 (incl. bijlagen, excl. RDP & distributielijst)
3

© 1998 TNO

TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium is onderdeel
van TNO Defensieonderzoek waartoe verder behoren:

TNO Prins Maurits Laboratorium
TNO Technische Menskunde



AQF99-04-0667

Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek TNO

19990119 062

Managementuittreksel

Titel : Doelopsporing met PHARUS
Auteur(s) : Ing. R.J. Dekker, Drs. J.S. Groot
Datum : juni 1998
Opdrachtnr. : -
IWP-nr. : 767
Rapportnr. : FEL-98-A045

Doelstelling

Het doel van dit project was het vergroten van de inzetbaarheid van SAR (Synthetische Apertuur Radar), en PHARUS (vliegtuig SAR) in het bijzonder, ten behoeve van de detectie en herkenning van niet bewegende militaire doelen. Het accent lag hierbij op detectie- en herkenningsalgoritmen die gebruik maken van polarimetrische SAR data.

Omschrijving van de werkzaamheden

In de eerste fase van dit project is een cursus gevolgd op het gebied van detectie en herkenning en is een grote literatuurstudie uitgevoerd naar detectie- en herkenningsalgoritmen voor polarimetrische SAR data. De meest belovende algoritmen zijn vervolgens geïmplementeerd en getest op PHARUS beelden van Swynnerton (UK), opgenomen tijdens de NAVO Panel 3 RSG-20 MIMEX proefnemingen in oktober 1996. De kwaliteit van deze beelden is grondig onderzocht ten behoeve van de evaluatie van de resultaten.

Resultaten

SAR data bevat meer ruis dan optische of infrarood beelden. Om het aantal false-alarms bij detectie en herkenning te beperken, wordt deze ruis vaak uitgefilterd. Diverse polarimetrische filter algoritmen zijn onderzocht. Het beste algoritme bleek het Polarimetrisch Whitening Filter (PWF). Het detecteren van militaire voertuigen met PHARUS bleek vervolgens zeer succesvol. Van de onderzochte detectoren bleek de Order-Statistics Constant False-Alarm Rate (OS-CFAR) detector het meest robuust. Het herkennen van militaire voertuigen op basis van de vorm en de polarimetrische eigenschappen bleek niet mogelijk. De belangrijkste oorzaak hiervan was de te lage resolutie van PHARUS die hier $3.5 \text{ m} \times 5.0 \text{ m}$ bedroeg. In het vervolg op dit onderzoek [de Vries 1998] is gekeken naar PWF gefilterde data met een hogere resolutie dan PHARUS op dit moment. Het strekt tot de aanbevelingen om ook te kijken naar de polarimetrische eigenschappen van hoge resolutie data. Detectie en herkenning kan het beste worden uitgevoerd in combinatie met andere sensoren als thermisch-infrarood (TIR), laser-radar en multispectrale scanners. Het voordeel van SAR en laser-radar is dat zij ook in staat zijn hoogte of diepte weer te geven.

Inhoud

1.	Inleiding	4
2.	Radar polarimetrie	6
3.	PHARUS data kwaliteit en ground-truth	7
4.	Doelopsporing theorie en resultaten	14
4.1	Pre-processing: speckle filtering	14
4.2	Detectoren	22
4.3	Herkenning	30
5.	Conclusies en aanbevelingen	34
6.	Referenties	35
7.	Ondertekening	38

Bijlagen

A	Ground-truth
B	Resultaten filters
C	Resultaten detectoren

1. Inleiding

Voor het opsporen van doelen kunnen verschillende sensoren worden gebruikt. SAR (Synthetische Apertuur Radar) is aan te bevelen omdat deze ongeacht het weer en ongeacht of het dag of nacht is, luchtopnamen kan maken. TNO-FEL heeft een eigen SAR systeem PHARUS (Phased Array Universal SAR) [Hoogeboom 1994] ontwikkeld, in samenwerking met NLR en TU Delft. Het bijzondere aan dit systeem is dat het volledig polarimetrisch is en daardoor meer informatie verzamelt over de aard van de belichte objecten. Daarnaast is PHARUS uitgerust met een phased array antenne, zodat het mogelijk is de richting van de antenne bundel te variëren tijdens de vlucht, wat de inzetbaarheid vergroot.

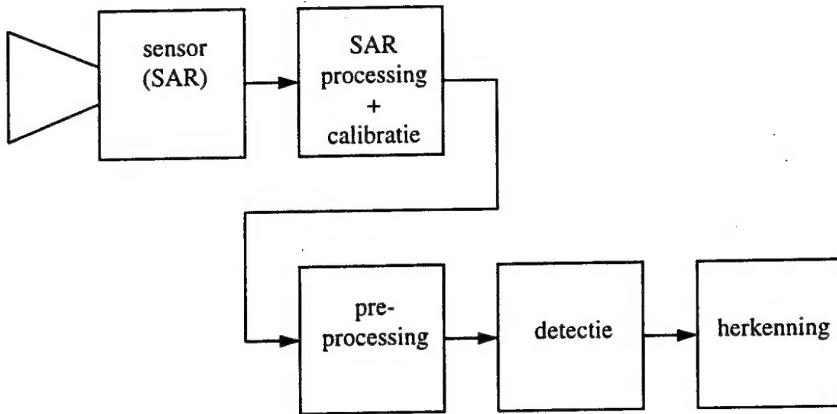
Dit rapport is een verslag van onderzoek dat is uitgevoerd naar methoden om doelen op te sporen met SAR, en in het bijzonder met PHARUS. Een doel kan hierbij ieder persoon, object of verschijnsel zijn waarin men is geïnteresseerd. Bij het opsporen van doelen kunnen de volgende niveaus onderscheiden worden:

Tabel 1.1: Definities van de verschillende niveaus die bij doelopsporing te onderscheiden zijn.

detectie	het ontdekken van de aanwezigheid van een persoon, object of verschijnsel
herkenning	het bepalen van de algemene aard van gedetecteerde personen, objecten of verschijnselen (klasse of type)
identificatie	het bepalen van de specifieke aard van gedetecteerde personen, objecten of verschijnselen (het individu binnen een klasse of type)

In het algemeen staat doelopsporing voor detectie en herkenning. Identificatie als bijvoorbeeld "vriend of vijand" gaat nog een stap verder en vraagt vaak zeer specifieke kenmerken en/of een vorm van communicatie. Binnen dit onderzoek is gekeken naar de detectie en herkenning van stationaire militaire voertuigen.

Het onderzoek bestond uit drie fasen. In de eerste fase is een cursus gevuld op het gebied van doeldetectie en herkenning [Nasr 1996] en is een uitgebreide literatuurstudie gedaan naar bestaande doelopsporingsmethoden [van Halsema 1998]. In de tweede fase zijn de meest belovende methoden geïmplementeerd en toegepast op PHARUS data. De derde fase omvatte de evaluatie van de toegepaste methoden, de rapportage en een voorstel voor een vervolgonderzoek. Uit de eerste fase bleek dat doelopsporing als volgt weergegeven kan worden:



Figuur 1.1: Doelopsporing schematisch weergegeven.

De laatste drie stappen vormen het eigenlijke doelopsporings gedeelte. In de pre-processing worden de beelden zoveel mogelijk ontdaan van ruis. Voor SAR is dit een belangrijke stap vanwege de sensor inherente speckle-ruis. In de detectie wordt onderscheid gemaakt tussen pixels die tot een doel behoren en pixels die tot de achtergrond behoren. Hierbij zullen ook objecten gedetecteerd worden die niet relevant zijn, maar dit onderscheid kan worden gemaakt bij de herkenning. Herkenning is een combinatie van feature extractie en classificatie op basis van die features. De SAR processing en calibratie horen niet bij doelopsporing maar zijn wel weergegeven omdat zij SAR specifiek zijn.

Bij de indeling van doelopsporing ligt ook de scheiding tussen dit onderzoek en het vervolgonderzoek. Het onderzoek waar hier verslag van wordt gedaan omvat pre-processing en detectie. Doelherkenning wordt kort besproken en uitgewerkt. Het vervolgonderzoek gaat hier verder. Door een vroege afbakening van de beide onderzoeken (in de eerste fase) en een vertraging van het hier beschreven onderzoek is het vervolgonderzoek reeds uitgevoerd [de Vries 1998]. Tussen het implementeren van de meest belovende methoden en de toepassing op PHARUS data (tweede fase), zat enige tijd omdat de calibratie problemen gaf die eerst opgelost moesten worden [Dekker 1997-1, 1997-2].

Dit rapport volgt ongeveer de lijn van figuur 1.1. Het eerst volgende hoofdstuk behandelt het polarimetrische aspect van de sensor. In hoofdstuk 3 wordt de PHARUS data besproken. Aan de orde komen de (SAR) processing, de calibratie, de kwaliteit van de data en de ground-truth. Hoofdstuk 4 gaat in op de meest belovende doelopsporingsmethoden en de resultaten hiervan op de PHARUS data. De indeling is die van pre-processing, detectie en herkenning. In hoofdstuk 5 worden conclusies en aanbevelingen gedaan.

2. Radar polarimetrie

Elektromagnetische golven hebben een oriëntatie die loodrecht op de voortplantingsrichting staat. De oriëntatie richting wordt ook wel de polarisatie genoemd. Een radar die zowel horizontaal als verticaal gepolariseerde golven uitzendt en ontvangt wordt een polarimetrische radar genoemd. Een dergelijke radar kan maximaal vier kanalen ontvangen: HH, HV, VH en VV (de eerste letter staat voor de ontvangst polarisatie, de tweede letter voor de zend polarisatie). De samples of pixels kunnen worden beschreven door de complexe scattering matrix:

$$\begin{pmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{hh} e^{j\varphi_{hh}} & A_{hv} e^{j\varphi_{hv}} \\ A_{vh} e^{j\varphi_{vh}} & A_{vv} e^{j\varphi_{vv}} \end{pmatrix} \quad (1)$$

A is de gemeten amplitude en φ de fase. Voor fase gecalibreerde data geldt dat $S_{hv} = S_{vh}$ [Zebker 1991]. De samples van deze data kunnen dus ook worden beschreven door de complexe vector:

$$X = \begin{pmatrix} S_{hh} \\ S_{hv} \\ S_{vv} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Vermenigvuldigen we X met zijn Hermitisch getransponeerde, dan ontstaat de covariantie matrix:

$$XX^H = \begin{pmatrix} S_{hh}S_{hh}^* & S_{hh}S_{hv}^* & S_{hh}S_{vv}^* \\ S_{hv}S_{hh}^* & S_{hv}S_{hv}^* & S_{hv}S_{vv}^* \\ S_{vv}S_{hh}^* & S_{vv}S_{hv}^* & S_{vv}S_{vv}^* \end{pmatrix} \quad (3)$$

H staat voor Hermitisch getransponeerd en $*$ voor complex geconjugeerd. De Stokes matrix is een andere notatie van de covariantie matrix. Voor de meeste gedistribueerde doelen kan (3) ook worden geschreven als [Novak 1990]:

$$\sigma_{hh} \begin{pmatrix} 1 & 0 & \rho\sqrt{\gamma} \\ 0 & \epsilon & 0 \\ \rho^*\sqrt{\gamma} & 0 & \gamma \end{pmatrix} \quad (4)$$

Hier staat σ_{hh} voor het vermogen van HH, ϵ voor de verhouding tussen het vermogen van HH en HV, γ voor de verhouding tussen het vermogen van HH en VV en ρ voor de correlatie tussen HH en VV. De resterende producten zijn 0 omdat er doorgaans geen correlatie bestaat tussen HH en HV en tussen HV en VV. Een voorwaarde voor deze representatie is wel dat de data volledig gecalibreerd is [Dekker 1998]. Op basis van de parameters van (4) is onderscheid te maken tussen doelen van verschillende aard of type (herkenning). Hoe goed dit gaat is een deel van de gestelde onderzoeksvraag die wordt beantwoord in hoofdstuk 4.

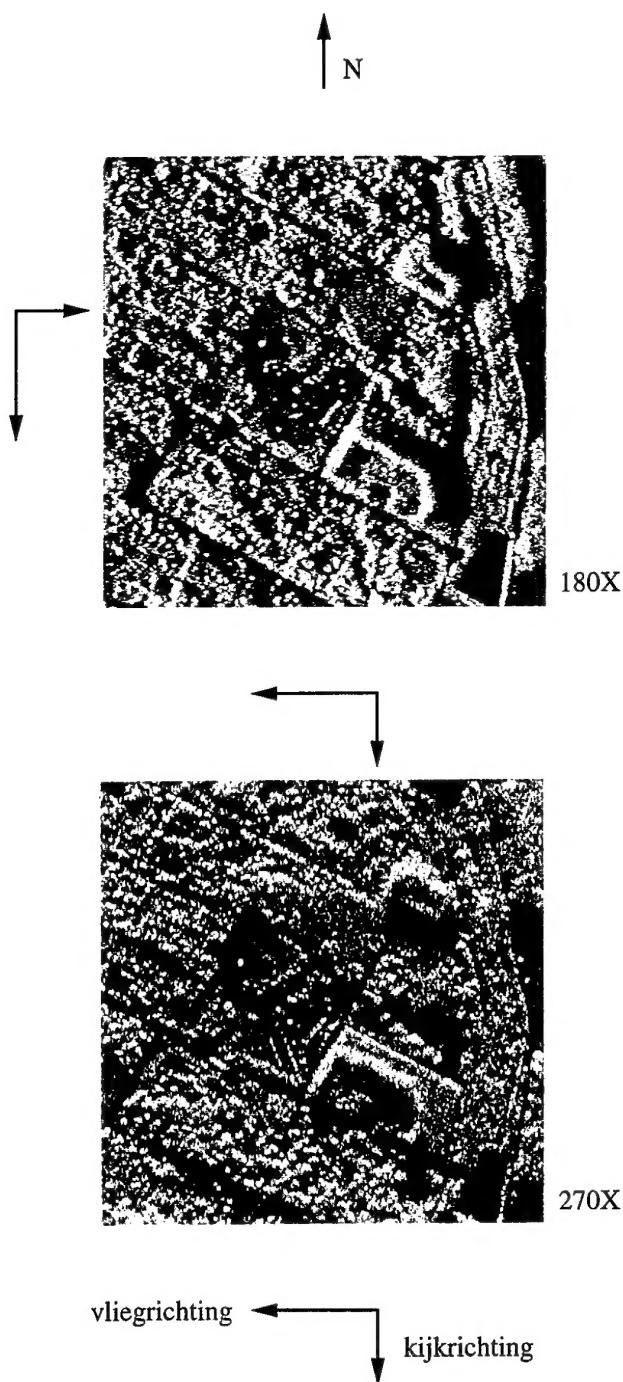
3. PHARUS data kwaliteit en ground-truth

Voor het testen van de doelopsporingsmethoden die in het volgende hoofdstuk worden behandeld is gekozen voor twee PHARUS opnamen van Swynnerton (UK). Beiden zijn gemaakt tijdens de NAVO Panel 3 RSG-20 MIMEX proefnemingen (30 september t/m 25 oktober 1996). Er is voor deze opnamen gekozen omdat zij een aantal bekende militaire voertuigen bevatten. Daarbij is de ground-truth tijdens de proefnemingen nauwkeurig vastgelegd [Bartlett 1997]. De ruwe PHARUS data is verwerkt met de GSP (Generieke SAR Processor) [Otten 1994], een ontwikkeling van TNO-FEL en ICT Automatisering. Vervolgens zijn de opnamen gecalibreerd met zelf ontwikkelde software [Dekker 1998], gebaseerd op de POLCAL software van het Jet Propulsion Laboratory (USA) [van Zyl 1990].

Figuur 3.1 laat de opnamen zien van het gebied waarin de voertuigen zich bevinden (ca. 750 m × 750 m). Tabel 3.1 geeft de parameters van beide opnamen weer, na de verschillende SAR specifieke operaties (zie figuur 1.1).

Geometrie en signaal-ruis-vervouding

Uit figuur 3.1 en tabel 3.1 blijkt dat de opnamen van verschillende kanten zijn belicht. Dit verklaart voor het grootste gedeelte de verschillen. De opnamen zijn met een tussentijd van circa 10 minuten gemaakt. Vooral tijdens opname 270X moest de antenne flink worden bijgesuurd (12°) vanwege de heading van het vliegtuig ten opzichte van de vliegrichting. PHARUS keek bij het gebied waarin de doelen zich bevinden ("area of interest", afgekort a.o.i.) zeer scherend in (circa 15°), wat de lange schaduwen veroorzaakt. Bij deze grazing-angle is de minimale te verwachten gamma -20 dB (HV) [Buitenhuis 1990], waaruit valt af te leiden dat de minimale signaal-ruis-verhouding rond de 11 dB ligt (zie tabel 3.1). Omdat de gamma van HH en VV gemiddeld circa 7 dB boven die van HV liggen, volgt dat de minimale signaal-ruis-verhouding van deze kanalen rond de 18 dB moet liggen. Er is getracht dit na te gaan voor het HH kanaal, door de gemiddelde vermogens van enkele gedistribueerde doelen, te vergelijken met die binnen enkele schaduwen, zie ook figuur 3.1. Schaduw bevat alleen thermische ruis en geen speckle (multiplicatieve ruis die het gevolg is van het coherente karakter van SAR data, normaal gesproken sterker dan thermische ruis). Hieruit bleek dat deze verhouding 10 dB slechter was (8 dB). Blijkbaar bevatten de schaduwen niet alleen thermische ruis. Uit een nadere analyse van de data bleek ten eerste dat de ruwe data was "vastgelopen". De versterkers van PHARUS werden zo ingesteld dat de ruis van de ontvangers net boven de kwantisatie-ruis van de AD-converters (ADC) uitkomt [Vermeulen 1996]. Voor de zekerheid was hier 10 dB extra bij opgeteld. Bij gebruik van de "most-significant" 8 bits van de data gaat daardoor niets verloren. De Gaussisch-vormige histogrammen van de I en Q kanalen waren echter zo breed (standaard deviaties van rond de 90) dat zij abrupt worden afgesneden bij ± 127 . Wat de gevolgen hiervan zijn is moeilijk na te gaan, maar dat het zorgt voor een slechter beeld is te zien in gebieden waar de reflecties hoger zijn (gebieden met bijvoorbeeld gebouwen). De achtergronden van deze reflecties worden daarbij



Figuur 3.1: De PHARUS opnamen van Swynnerton (UK) waarmee de doelopsporingsmethoden worden getest ($R=HH$, $G=HV$, $B=VV$). In het midden bevindt zich het gebied waar de voertuigen (de doelen) zijn opgesteld.

Tabel 3.1: De (kwaliteit) parameters van de PHARUS opnamen van Swynnerton (UK) tijdens de verschillende SAR specifieke operaties.

		common	180X	270X
date	d/m/y	24/10/1997		
time	GMT		12:56:36	12:45:54
track			180°	270°
beam angle			-4.5°	12.0°
altitude			3096 m	3052 m
projection		slant range		
slant range	a.o.i.		12190 m	11490 m
grazing angle	a.o.i.		14.7°	15.4°
signal-to-noise	$\gamma = -20 \text{ dB}$		10.4 dB	11.6 dB
accuracy	ADC	8 bits		
deviation	HH		97.4	88.0
after processing				
pixel spacing	range	1.5 m		
	azimuth		0.31518 m	0.35770 m
resolution	range	5.0 m		
	azimuth	1.2 m		
ENL	HH	1		
$\varphi_{hh} - \varphi_{vv}$	a.o.i.	175°		
$\varphi_{hv} - \varphi_{vh}$	a.o.i.	135°		
cross-talk level		< -20 dB		
gain-imbalance			-5.3 dB	-3.5 dB
after calibration				
pixel spacing	range	1.5 m		
	azimuth		1.5759 m	1.4308 m
resolution	range	5.0 m		
	azimuth		3.1518 m	3.5770 m
ENL	HH	2.8		
$\varphi_{hh} - \varphi_{vv}$		< 10°		
cross-talk level		< -30 dB		
gain-imbalance		< 1.0 dB		

sterk onderdrukt. In gebieden waar dit minder goed is te zien kan het echter nog steeds zo zijn dat de gevolgen van het vastlopen van de ruwe data, de oorspronkelijke signaal-ruis-verhouding overtreft. Ten tweede was er tijdens de opnamen geen tapering toegepast waardoor de zijklussen van de antenne niet zijn onderdrukt. Dit kan tot gevolg hebben dat de zijklussen van één doel doorspreken in een ander doel. Tot slot spreken ook de randen door en zijn de schaduwen mogelijk te kort (tot 50 m slant range), om een goede bepaling te doen van de signaal-ruis-verhouding.

SAR processing

De ruwe PHARUS data ondergaat twee correlatie slagen voordat het een scherp beeld oplevert. Er is gekozen voor een maximale resolutie met weging: 1.0 m in azimuth (along track) en 3.4 m in range (cross-track) richting. De oorspronkelijke pixel afmeting in range van de complexe ruwe PHARUS data bedroeg 3.0 m. Na de correlatie en calibratie is de data echter niet meer complex maar gedetecteerd zodat dit niet meer voldoende is ten opzichte van de resolutie. Daarom is de pixel afmeting van de complexe ruwe data (en de chirp) gehalveerd tot 1.5 m door interpolatie. Gekozen is voor de nearest-neighbour methode omdat deze de statistische eigenschappen (gemiddelde, standaard deviatie, autocorrelatie functie, etc.) het beste behoudt [Quegan 1990]. Na metingen bleek de range resolutie geen 3.4 m maar 5.0 m. De oorzaak hiervan bleek het gedeelte van de software dat zorgt voor de range-migratie correctie tijdens de azimuth correlatie. Voor de azimuth correlatie bleek de range resolutie tussen 3.0 m en 4.0 m te liggen. De pixel afmeting in azimuth bleek ruim voldoende voor een azimuth resolutie die 1.2 m bleek te bedragen.

Calibratie

De calibratie van de beelden houdt het volgende in:

- fase calibratie
- receiver-gain correctie
- symmetrisatie
- conversie naar covariantie matrix
- multi-looking (optioneel)
- cross-talk calibratie
- gain-imbalance calibratie
- absolute calibratie

Voor details wordt verwezen naar [Dekker 1998]. De eerste stap trekt de fases van de vier kanalen in de scattering matrix gelijk, zie vergelijking (1). De receiver-gain correctie compenseert voor de instelling van de versterkers die vooraf gaan aan de AD-converters van PHARUS. In de symmetrisatie worden de kanalen HV en VH gemiddeld, ter verbetering van de signaal-ruis-verhouding in het nieuwe HV kanaal. Multi-looking is optioneel en houdt in het middelen van een aantal samples in azimuth zodat de speckle afneemt. Door multi-looking neemt ook de resolutie af

en kan het data volume worden verkleind. In de volgende paragraaf wordt dieper ingegaan op multi-looking. De cross-talk calibratie zuivert de verzonden en ontvangen polarisaties van andere oriëntaties. Uitgezonden horizontaal gepolariseerde golven bijvoorbeeld, blijken ook een kleine verticale component te hebben. De gain-imbalance calibratie corrigeert voor gain verschillen tussen het horizontale en verticale pad binnen de radar, meestal veroorzaakt door verschillen in antenne-gain voor H en V. Bij PHARUS is de gain-imbalance erg groot en afhankelijk van de stand van de antenne-bundel (beam angle). Dit komt omdat een andere stand van de antenne-bundel resulteert in een ander antennepatroon [Vermeulen 1996] en dus een andere gain. De gain-imbalance van de hier besproken opnamen bedroeg -5.3 dB en -3.5 dB voor calibratie, corresponderend met beam angles van -4.5° en 12°. In de absolute calibratie wordt het ontvangen vermogen omgerekend naar gamma waarden [van den Broek 1993]. De absolute calibratie is niet uitgevoerd omdat het absolute nivo niet van belang is binnen de covariantie matrix gegeven door vergelijking (4).

Equivalent-number-of-looks

Ten behoeve van de presentatie van de data is gekozen voor een vierkante resolutie cel van ongeveer $3.4 \text{ m} \times 3.4 \text{ m}$ (dat de range resolutie 5.0 m bedroeg bleek later). Hierdoor was het mogelijk om iedere 10 samples in azimuth te middelen en een reductie factor van 4 à 5 toe te passen. Dit wordt ook wel multi-looking genoemd. Het equivalent-number-of-looks (ENL) is een maat voor de speckle reductie die hierbij optreedt, en wordt gedefinieerd als [Moreira 1991]:

$$\text{ENL} = \frac{\mu^2}{\sigma^2} \quad (5)$$

μ is het gemiddelde en σ de standaard deviatie. Hierbij geldt dat het gebied waarbinnen deze parameters worden bepaald, homogeen moet zijn en geen textuur mag bevatten. Of dit het geval is zal proefondervindelijk moeten worden vastgesteld, door het ENL te bepalen van meerdere ogen schijnlijk homogene gebieden (wat op het oog homogeen is hoeft nog niet zo zijn). De meest waarschijnlijke ENL zal zich bevinden bij de maximale waarden. De waarde 2.8 in tabel 3.1 (na calibratie) is met deze methode bepaald. Het ENL kan ook worden berekend met behulp van de vergelijking [Moreira 1991]:

$$\text{ENL} = \frac{L}{1 + 2 \sum_{i=1}^{L-1} \frac{L-i}{L} \rho_{i+1,1}^2} \quad (6)$$

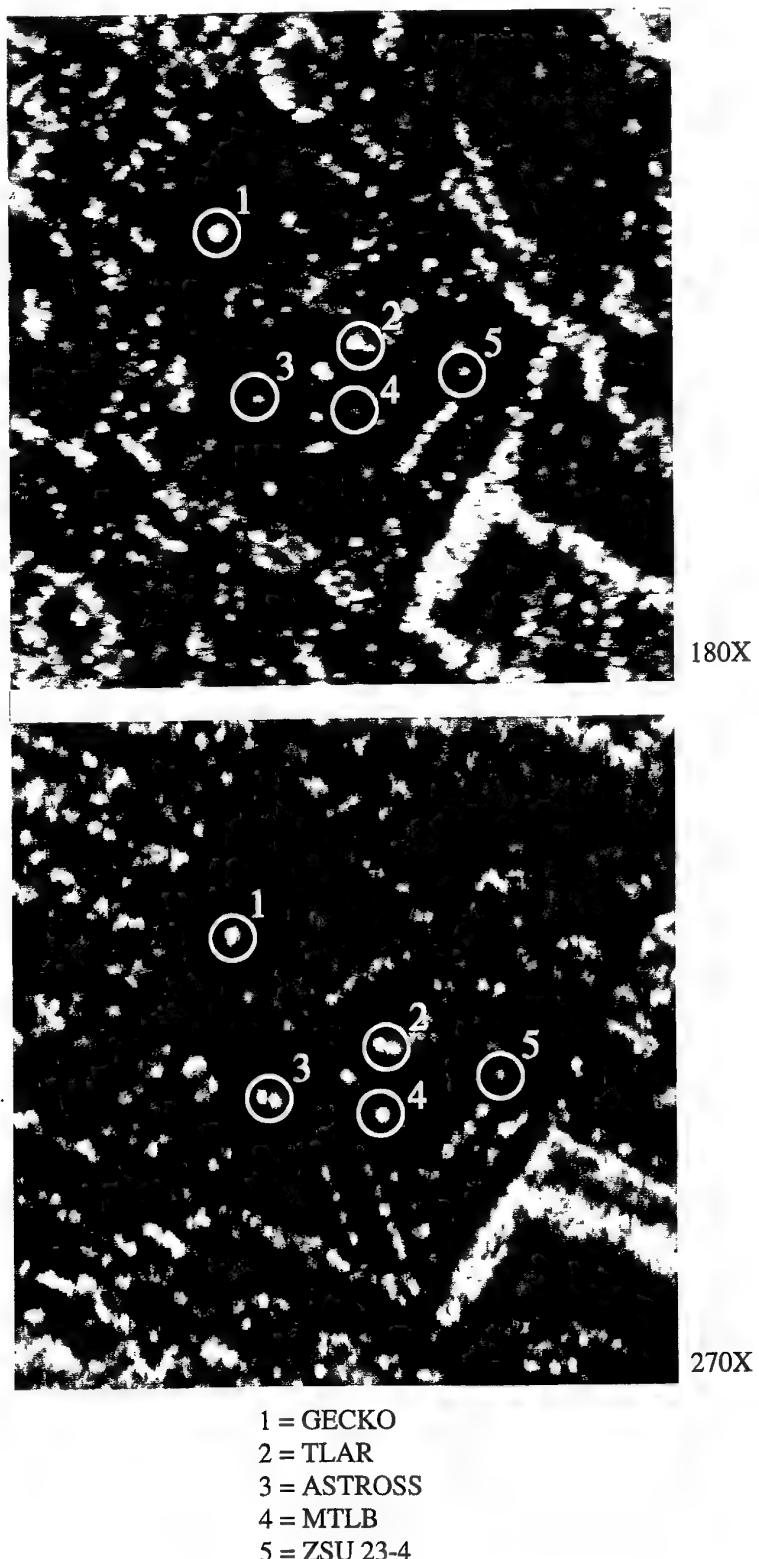
L is het aantal samples dat wordt gemiddeld (hier 10) en $\rho_{i+1,1}$ is de correlatie coefficient tussen sample $i+1$ en sample 1. De correlatie coefficient kon worden afgeleid met behulp van [Ulaby 1986]:

$$\rho_{i+1,1} = \text{sinc}^2 \left(\frac{i \pi}{L} \right) \quad (7)$$

Hier is dx de pixel afstand in azimuth en r_x de azimuth resolutie. Bij de hier toegepaste multi-look methode is alleen de correlatie in azimuth richting van belang. Door de gegevens van tabel 3.1 in te vullen in vergelijking (6) en (7) volgen een ENL van 4.3 voor 180X en 4.8 voor 270X. De waarde bepaald met de methode van vergelijking (5) is echter significant lager; waarschijnlijk veroorzaakt door de slechtere signaal-ruis-verhouding ten gevolge van het vastlopen van de data en het niet toepassen van antenne tapering. Het is niet waarschijnlijk dat alle gebieden waarbinnen het ENL werd bepaald, minder homogeen waren dan verwacht. Door bij het middelen van samples gebruik te maken van weging, is het mogelijk om (met behoud van resolutie) het ENL te verhogen met ongeveer een factor 1.5 [Li 1983]. Dit is niet verder onderzocht omdat de tijd hiervoor ontbrak.

Ground-truth

Binnen dit onderzoek is gekeken naar de waarneembaarheid van stationaire militaire voertuigen met PHARUS. Hierbij is data gebruikt die is opgenomen tijdens de in de inleiding met naam genoemde proefnemingen bij Swynnerton (UK). Een van de redenen waarom gekozen is voor deze opnamen is de aanwezigheid van ground-truth data [Bartlett 1997]. Tijdens deze proefnemingen zijn er in een terrein van ca. 250 m x 250 m vijf militaire voertuigen neergezet. Het terrein betrof bos afgewisseld door veel grote en kleine open plekken hoofdzakelijk begroeid met gras. Op dit terrein bevond zich ook een baan voor het werpen van handgranaat (grenade-range). Bijlage A toont een collectie foto's en een kaart van het terrein. De collectie omvat luchtfoto's, panorama's en foto's van de gestationeerde voertuigen. De locaties van de voertuigen zijn aangegeven op de kaart. Op basis van deze informatie is in uitsneden van de twee PHARUS opnamen van figuur 3.1 aangegeven wat de voertuigen zijn, zie figuur 3.2. Hierbij valt op dat dit onderscheid met het oog niet gemakkelijk is te maken. In het volgende hoofdstuk wordt bekeken of deze doelen gedetecteerd kunnen worden met behulp van algoritmen en of zij te onderscheiden zijn van andere objecten die geen doel zijn maar wel gedetecteerd worden (false-alarms), anders gezegd: of zij herkend worden als doel. Door de resolutie van de PHARUS opnamen is het aantal pixels dat een doel beslaat klein. Dit sluit echter niet bij voorbaat uit dat PHARUS ongeschikt is voor het opsporen van doelen. Doeldetectie en herkenning zijn vaak een kwestie van het gebruiken van meerdere sensoren (sensor-fusie), waarbij sensoren elkaar ondersteunen [Nasr 1996]. Een voorbeeld hiervan is dat één sensor een doel detecteert en aangeeft aan andere sensoren ter herkenning (cueing).



Figuur 3.2: Uitvergroting (3x) van de PHARUS opnamen van figuur 3.1 waarin de voertuigen zijn aangegeven.

4. Doelopsporing theorie en resultaten

In dit hoofdstuk worden de meest belovende doelopsporingsmethoden besproken en toegepast op de besproken PHARUS opnamen. De onderverdeling is die van figuur 1.1: pre-processing methoden, detectoren en herkennung.

4.1 Pre-processing: speckle filtering

Detectie in SAR beelden heeft baat bij de reductie van speckle, omdat de standaarddeviatie van de achtergrond van een doel hierdoor afneemt (zie ook paragraaf 4.2). Binnen dit onderzoek is een literatuur studie gedaan naar polarimetrische en spatiële-polarimetrische filters. Het verslag hiervan is te vinden in [van Halsma 1998]. De meest belovende methoden zijn geïmplementeerd en worden in de volgende alinea's beschreven. Belangrijk bij filteren is dat de resolutie gelijk blijft zodat de reflecties van de doelen niet aangetast worden. Daarom zijn bijna alle spatiële methoden afgevallen. De hier beschreven filters zijn dan ook allemaal polarimetrische filters, op het wavelet-shrinkage filter na. Dit filter bleek zulke goede resultaten op te leveren [Guo 1994] en was dermate onbekend, dat het is meegenomen in dit onderzoek.

Standard-deviation-to-mean ratio

De filters zullen worden vergeleken aan de hand van de standard-deviation-to-mean ratio die veel gebruikt wordt in de bestudeerde literatuur. De standard-deviation-to-mean wordt gedefinieerd als [Novak 1990]:

$$s/m = \frac{\sigma}{\mu} \quad (8)$$

Vergelijken we deze definitie met die van vergelijking (5) dan volgt dat de standard-deviation-to-mean gelijk is aan $1/\sqrt{ENL}$. Net als bij vergelijking (5) geldt ook hier dat het gebied waarbinnen de standaard deviatie en het gemiddelde worden bepaald, homogeen moet zijn en geen textuur mag bevatten. De standard-deviation-to-mean ratio, s/m ratio of $\Delta(s/m)$ is het verschil tussen de in- en output standard-deviation-to-mean van een filter. Beiden (s/m en ratio) worden meestal uitgedrukt in dB's ($20\log(s/m)$).

Dual Channel

Polarimetrische data is normaal gesproken drielanaals. Er zijn ook systemen te bedenken die twee kanalen bezitten. In [Nasr 1990] is onderzocht wat dit voor effect heeft op het detecteren van gedistribueerde doelen. Onderzocht is het gemiddelde:

$$y = \frac{|HH|^2 + |VV|^2}{2} \quad (9)$$

Voor de standard-deviation-to-mean ratio geldt:

$$\Delta(s/m) = \frac{\sqrt{1+\gamma^2 + 2|\rho|^2\gamma}}{1+\gamma} \quad (10)$$

Voor de parameters γ en ρ wordt verwezen naar hoofdstuk 2. Het is gemakkelijk in te zien dat wanneer beide kanalen gelijk zijn ($\gamma = 1$) en niet gecorreleerd ($\rho = 0$), de s/m ratio maximaal -3 dB kan worden. In de praktijk komen dergelijke achtergronden zelden voor en is de s/m ratio meestal slechter dan -3 dB.

Span

Het gemiddelde vermogen van driekanaals data, ook wel de span of total power genoemd, wordt doorgaans als volgt berekend [Nasr 1990, Novak 1990]:

$$y = \frac{|HH|^2 + 2|HV|^2 + |VV|^2}{4} \quad (11)$$

Hierbij wordt het vermogen van HV twee keer meegenomen omdat dit gemiddeld lager is dan dat van HH en VV. Voor de s/m ratio geldt:

$$\Delta(s/m) = \frac{\sqrt{1+4\varepsilon^2 + \gamma^2 + 2|\rho|^2\gamma}}{1+2\varepsilon+\gamma} \quad (12)$$

De maximale s/m ratio voor het span filter volgt voor $\varepsilon = 0.5$, $\gamma = 1$ en $\rho = 0$, en bedraagt -4.77 dB. Hierbij mag er geen correlatie zijn tussen HV en de overige twee kanalen. In de praktijk is de s/m ratio bijna altijd slechter dan -4.77 dB.

OIS

Het Optimal Intensity Sum (OIS) filter is vergelijkbaar met de vorige twee filters. Het verschil is echter dat het een adaptief filter is en een optimaal gemiddelde of som van de vermogens berekent op basis van de covariantie matrix van de gemiddelde achtergrond. De filtervergelijking is als volgt [Novak 1990]:

$$y = \frac{|HH|^2 + \frac{1+|\rho|^2}{\varepsilon}|HV|^2 + \frac{1}{\gamma}|VV|^2}{3+|\rho|^2} \quad (13)$$

Dit filter kent twee varianten: (a) waarbij in een moving window rond ieder pixel de gemiddelde covariantie matrix van de achtergrond wordt berekend en (b) een snelle variant waarbij één gemiddelde covariantie matrix wordt gebruikt voor het hele beeld. Voor de s/m ratio van de (a) variant geldt:

$$\Delta(s/m) = \frac{\sqrt{3+4|\rho|^2+|\rho|^4}}{\sqrt{9+6|\rho|^2+|\rho|^4}} \quad (14)$$

Voor de (b) variant geldt deze vergelijking alleen als de gemiddelde covariantie matrix rondom een pixel gelijk is aan de globale covariantie matrix. De voorkeur

gaat uit naar de (b) variant vanwege de snelheid en het feit dat de te detecteren doelen in één beeld vaak eenzelfde achtergrond hebben. Is er geen correlatie tussen HH en VV ($\rho = 0$) dan is de s/m ratio -4.77 dB. Zijn zij volledig gecorreleerd ($\rho = 1$) dan is de s/m ratio -3 dB.

PWF

Het Polarimetric Whitening Filter [Novak 1990, 1993] is het optimale polarimetrische filter. De essentie van dit filter is dat het de oorspronkelijke polarimetrische data met de lineaire basis (HH, HV, VV) transformeert naar data met een basis waarin de drie kanalen niet gecorreleerd zijn. Het PWF beeld is het gemiddelde van deze kanalen. De filtervergelijking voor multi-look data wordt gegeven door [Liu 1995]:

$$y = \frac{\text{tr}(\Sigma_c^{-1} XX^H)}{3} \quad (15)$$

Hier is XX^H de sample covariantie matrix, zie (3), Σ_c de gemiddelde covariantie matrix van de omgeving rond XX^H en $\text{tr}(\cdot)$ de trace van een matrix. Het PWF filter kent dezelfde twee varianten als het OIS filter. Voor de s/m ratio van de (a) variant geldt:

$$\Delta(\text{s/m}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (-4.77 \text{ dB}) \quad (16)$$

Om dezelfde redenen als bij het OIS filter gaat de voorkeur hier ook uit naar de (b) variant. Het verschil in performance tussen beide varianten bleek minimaal [Novak 1993]. Vergelijking (16) geldt dus ook voor de (b) variant. Voor de covariantie matrix Σ_c kan het beste worden gekozen voor die van de achtergrond van de te detecteren doelen.

DIWF

Polarimetrische data kan ook getransformeerd worden naar data met de lineaire basis (HH-VV, HV, HH+VV). De eerste twee kanalen van deze basis behoren tot de dihedral-corner (even) reflecties, het laatste kanaal tot de vlakke plaat en trihedral-corner (oneven) reflecties [Freeman 1992]. Hierbij slaat even en oneven op het aantal keren dat de radar golven worden weerkaatst. Dihedral- en trihedral-corner reflecties zijn kenmerkend voor man-made objecten als militaire voertuigen. Analoog aan het PWF filter wordt de optimale combinatie van de kanalen (HH-VV, HV) het Dihedral Whitening Filter (DIWF) genoemd. Het filter kan als volgt worden geschreven [Larson 1995]:

$$y = \frac{\frac{1}{1 + \gamma - 2\sqrt{\gamma} \text{Re}(\rho)} |HH - VV|^2 + \frac{1}{\epsilon} |HV|^2}{2} \quad (17)$$

De s/m ratio van dit filter is niet bekend.

TRIWF

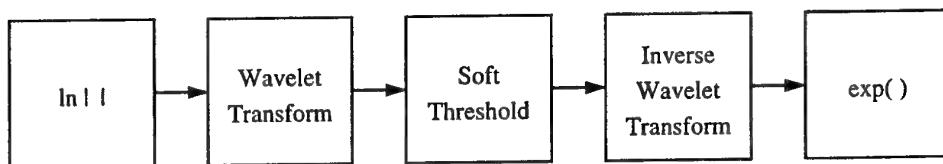
Analoog aan het DIWF is ook het Trihedral Whitening Filter (TRIWF) uitgewerkt:

$$y = \frac{1}{1 + \gamma + 2\sqrt{\gamma \operatorname{Re}(\rho)}} |HH + VV|^2 \quad (18)$$

De s/m ratio van dit filter is net als bij het DIWF niet bekend.

Wavelet Shrinkage filter

Het enige niet polarimetrische filter dat is geïmplementeerd is het Wavelet Shrinkage of VisuShrink filter [Donoho 1994, 1995]. Het filter is uitgewerkt ten behoeve van doel detectie en herkenning [Guo 1994]. Het Wavelet Shrinkage filter komt in essentie neer op "soft-thresholding" in het wavelet domein, zie figuur 4.1.



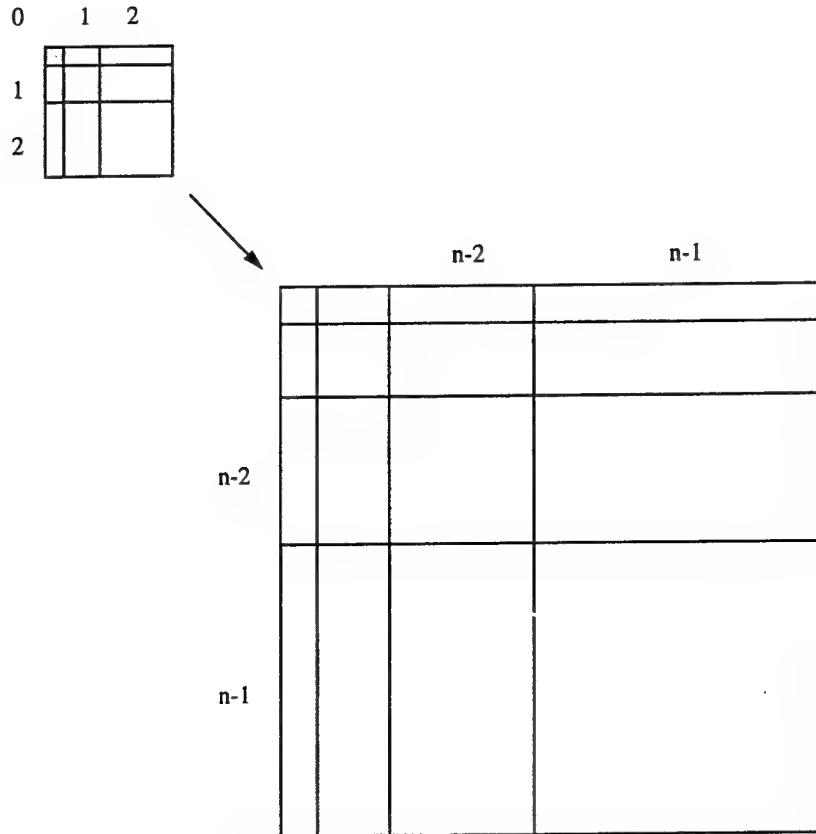
Figuur 4.1: Schematische weergave van het Wavelet Shrinkage filter.

Hierbij wordt de wavelet transformatie uitgevoerd op logaritmisch geschaalde data. Dit heeft het voordeel dat de speckle die van nature multiplicatief is, additief wordt. Nadeel hiervan is dat het gemiddelde na de inverse logaritme niet meer te reconstrueren is [Hoekman 1991]. Voor detectie is dit geen probleem. Andere operaties als classificatie zouden hierdoor echter wel verkeerd kunnen gaan.

Als wavelet transformatie werd gekozen voor de Daubechies' wavelet met vier coëfficiënten (D4) [Press 1992]. Een wavelet transformatie is de inverse Fourier transformatie van een Fourier (frequentie) domein dat is ingedeeld in verschillende logaritmisch ingedeelde frequentie intervallen [Chui 1992]. Zij bewerkstelligt een decompositie van de verschillende resolutie niveaus die in een beeld aanwezig zijn, zie figuur 4.2. Het hoogste niveau ($n-1$) bevat voornamelijk ruis en het laagste niveau (0) is de DC component; het gemiddelde. Alleen de hoogste niveaus (op zijn minst vijf) ondergaan soft-thresholding. De laagste niveaus (vanaf 0) blijven gelijk waardoor het gemiddelde van het beeld behouden blijft. Bij soft-thresholding worden waarden niet begrensd, zoals bij hard-thresholding (clipping), maar verlaagd met een bepaalde waarde:

$$w' = \begin{cases} \operatorname{sign}(w)(|w|-t) & \text{if } |w| > t \\ 0 & \text{if } |w| \leq t \end{cases} \quad (19)$$

Hier is t de soft-threshold en w een sample van een van de hoogste niveaus in het wavelet domein. [Guo 1994] gaf aan dat de threshold t het beste kon liggen tussen de 1.5σ en 3σ omdat de doelen anders te veel werden aangetast. De standaarddeviatie werd bepaald in het hoogste niveau ($n-1$). De s/m ratio van dit filter laat zich moeilijk voorspellen. In de literatuur [Guo 1994] worden met de beschreven methode s/m ratios behaald van circa 0.5 (-6 dB) bovenop PWF gefilterde data.



Figuur 4.2: Het wavelet domein van een tweedimensionale wavelet transformatie.

Resultaten

Alle besproken filters behalve het dual channel en span filter zijn adaptief. Het OIS en de whitening filters (PWF, DIWF en TRIWF) hebben de covariantie matrix van de achtergrond nodig als input. In beide PHARUS opnamen (zie hoofdstuk 3) is nagegaan wat de gemiddelde (20×20 pixels) achtergrond matrix was, zie tabel 4.1, kolom Σ_c . Uit de foto's van bijlage A bleek de achtergrond gras te zijn. De s/m ratio's in dezelfde kolom zijn berekend met de formules (10), (12), (14) en (16) en de covariantie matrix. In deze tabel zijn ook weergegeven de covariantie matrices van enkele homogene testgebieden die zijn gebruikt voor het bepalen van de s/m ratio's van de filters. Aan de covariantie matrices te zien zijn de velden waarschijnlijk verschillend, de exacte aard is echter niet bekend. Het Wavelet Shrinkage filter is ook adaptief en bepaalt zijn resultaat op basis van de standaard deviatie van de speckle. Het is geïmplementeerd als beschreven. De lengte van de D4 wavelet bedroeg 512×512 samples. Soft-thresholding werd toegepast op de hoogste vijf niveaus (4 t/m 8). De standaard deviatie werd bepaald op het hoogste niveau (8). Uitgewerkt zijn de filters met een soft-threshold van 2.5σ (W2.5S) en 5σ (W5S).

Bijlage B toont het HH, HV en VV kanaal van de opnamen en de resultaten van alle hier beschreven filters. Tabel 4.1 toont de corresponderende s/m ratio's ge-

meten in de testgebieden. We zien dat de polarimetrische filters binnen een kleine marge voldoen aan de verwachtingen. Verschillen kunnen worden veroorzaakt doordat er toch enige textuur aanwezig is, of door de slechtere signaal-ruis-verhouding besproken in hoofdstuk 3. De verschillen blijven echter klein. Dit geldt niet voor het DIWF en het TRIWF. De Wavelet Shrinkage filters presteren minder dan die van [Guo 1994]. Vermoed wordt dat de prestaties van deze filters afhangen van wat er aan speckle wordt aangeboden, ofwel, dat wanneer er minder ruis aanwezig is, er minder te filteren valt. In beide gevallen werd PWF data aangeboden, echter het PWF hier gaf betere resultaten dan bij [Guo 1994]. Vergelijken we onze resultaten van beide wavelet filters met die van het PWF (bijlage B), dan zien we dat het 2.5σ filter een lichte verbetering geeft en dat het 5σ filter het beeld begint aan te tasten. De grens van 3σ lijkt daardoor bevestigd.

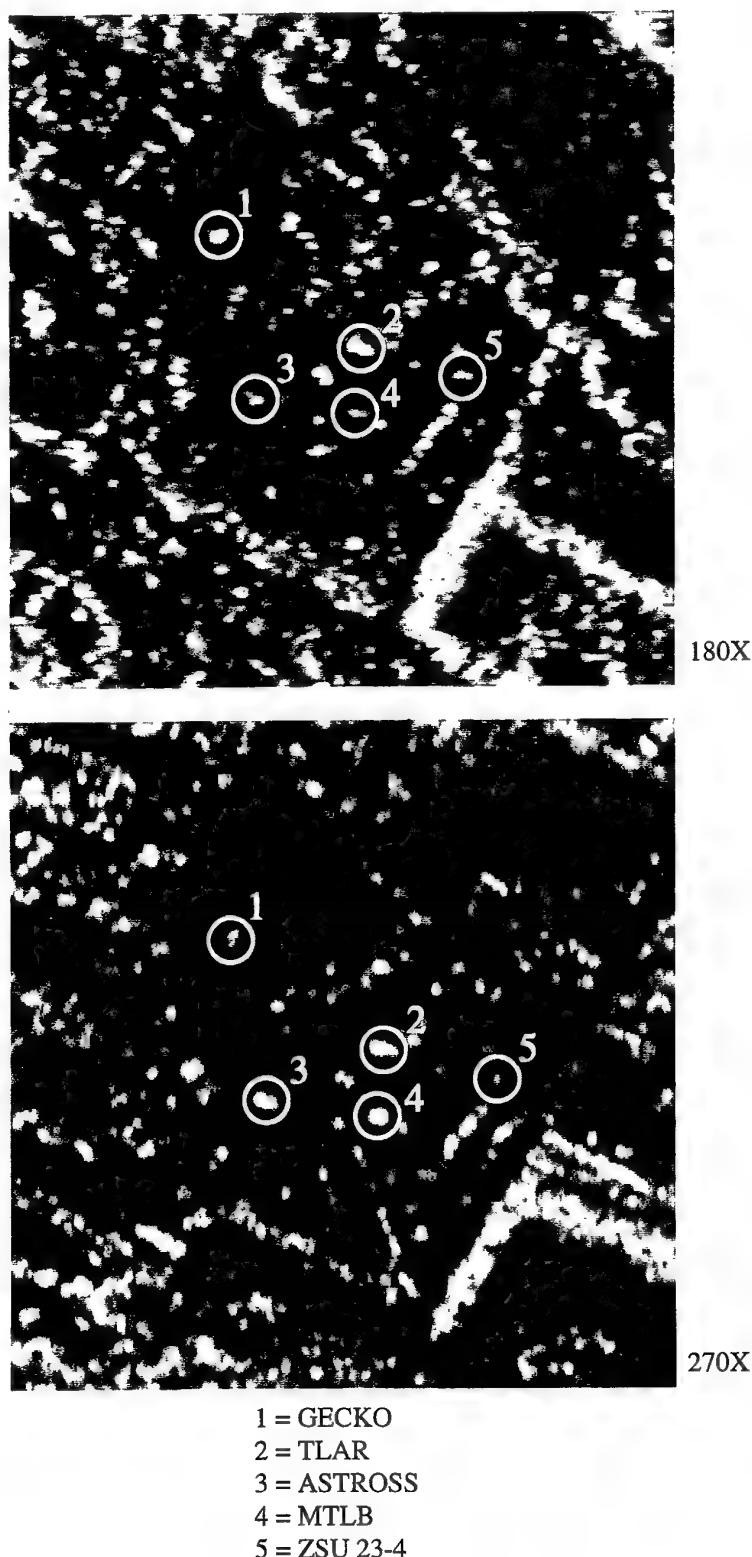
Uit tabel 4.1 blijkt dat het PWF filter het beste polarimetrische filter is. Span en OIS zijn hiervoor een goed alternatief, mede door de eenvoud van deze filters. Het Wavelet Shrinkage filter geeft nog enige verbetering op het PWF. Of het Wavelet Shrinkage filter doelen aantast zal moeten blijken bij de detectie in paragraaf 4.2. Het DIWF presteert goed, vooral bij bomen. Het TRIWF blijkt helemaal niet te filteren. De combinatie DIWF/TRIWF kan worden gezien als een decompositie van dihedral (even) reflecties en vlakke plaat en trihedral (oneven) reflecties. Figuur 4.3 toont een compositie van beide beelden in complementaire kleuren. Een dergelijk beeld geeft een indicatie of reflecties meer even zijn dan oneven of omgekeerd. Wat opvalt is dat vooral in de PHARUS opname 270X er enkele voertuigen zijn met een uitgesproken aard (even/oneven). Tabel 4.2 laat tot slot zien wat de equivalent-number-of-looks zijn van de oorspronkelijke data en na toepassing van de verschillende filters. Wat opvalt is dat de equivalent-number-of-looks van de kanalen HH, HV en VV niet gelijk zijn. Dit kan doorspreken in de resultaten van de diverse filters.

Tabel 4.1: De covariantie matrices van de achtergrond Σ_c en de test gebieden, en de s/m ratio's van deze gebieden na de verschillende filters.

	Σ_c	180X trees		270X trees	
		field		field	
ϵ	0.19	0.16	0.32	0.10	0.27
γ	1.00	1.64	0.93	0.92	0.86
$ \rho $	0.45	0.62	0.36	0.38	0.29
$\angle\rho$	0°	2.7°	26.1°	23.9°	28.3°
<hr/>					
s/m to HH					
TRIWF		-0.11	1.38	0.72	1.13
DUAL	-2.21	-1.86	-1.39	-2.10	-1.46
DIWF		-2.77	-4.41	-2.22	-4.01
SPAN	-3.47	-2.84	-2.78	-2.86	-3.18
OIS	-4.25	-3.67	-3.82	-3.71	-4.04
PWF	-4.77	-4.77	-4.82	-4.23	-4.61
<hr/>					
s/m to PWF					
W2.5S		-1.74	-1.16	-1.02	-1.51
W5S		-2.93	-1.83	-1.66	-2.82

Tabel 4.2: De equivalent-number-of-looks van de test gebieden na de verschillende filters.

	180X trees		270X trees	
	field		field	
HH	2.74	2.20	3.01	2.84
HV	1.72	2.49	2.50	3.43
VV	3.16	2.00	2.04	2.49
<hr/>				
TRIWF	2.81	1.60	2.55	2.19
DUAL	4.21	3.02	4.88	3.97
DIWF	5.18	6.08	5.02	7.15
SPAN	5.26	4.17	5.81	5.90
OIS	6.37	5.29	7.07	7.19
PWF	8.20	6.66	7.97	8.20
<hr/>				
PWF+W2.5S	12.24	8.69	10.07	11.61
PWF+W5S	16.11	10.15	11.67	15.69



Figuur 4.3: Composities van de DIWF beelden (rood) en TRIWF beelden (cyaan): twee decomposities van dihedral (even) reflecties en trihedral (oneven) reflecties.

4.2 Detectoren

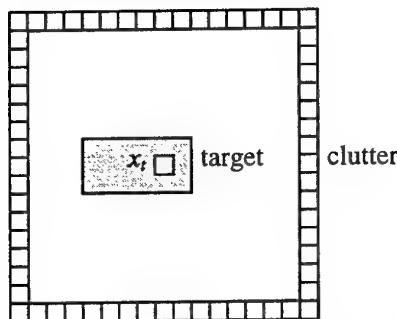
Na de pre-processing (speckle filtering) volgt de detectie van de samples (pixels) die tot een doel behoren. Verschillende detectoren zijn onderzocht.

Klassieke CFAR detector

Bij veel detectoren wordt de waarde van een sample vergeleken met het gemiddelde van de achtergrond clutter. Is het verschil groter dan een bepaalde threshold dan wordt aangenomen dat deze sample tot een doel behoort. Bij Constant False Alarm Rate (CFAR) detectoren is de threshold gesplitst in de standaard deviatie van de achtergrond en een constante [Goldstein 1973]:

$$\frac{x_i - \mu_c}{\sigma_c} > K_{CFAR} \quad (20)$$

Hier is x_i de sample die getest wordt, μ_c het gemiddelde van de achtergrond, σ_c de standaard deviatie van de achtergrond en K_{CFAR} de CFAR constante. Voor radar beelden wordt vaak een volgende template gebruikt [Novak 1991, 1992]:



Figuur 4.4: CFAR template met target.

De betrouwbaarheid van het gemiddelde μ_c en de standaard deviatie σ_c wordt bepaald door de omvang van de template (het aantal achtergrond samples). Hoe hoger het aantal samples des te lager het detectie verlies. De omvang van de template is afhankelijk van de omvang van de doelen, de omgeving en de pixelafmetingen. Wordt een template te klein ten opzichte van het doel, dan bevinden zich te veel doelpixels tussen de clutterpixels waardoor het gemiddelde en de standaard deviatie minder betrouwbaar zijn. Wordt een template te groot dan bestaat de mogelijkheid dat een doel niet meer wordt vergeleken met zijn directe achtergrond, maar met een andere, verder weg gelegen achtergrond. In bijvoorbeeld [Novak 1991] is gekozen voor een template van 41×41 pixels (totaal 160) corresponderend met een afmeting van $12.5 \text{ m} \times 12.5 \text{ m}$ (pixelafmeting $0.30 \text{ m} \times 0.30 \text{ m}$) ten behoeve van het detecteren van stationaire militaire doelen. De CFAR constante is afhankelijk van de gewenste kans op een false-alarm veroorzaakt door de ruis in het radar beeld. De relatie is:

$$P_{fa} = \int_{\sigma_x K_{CFAR}}^{\infty} P(x|I=1) dx \quad (21)$$

Hier is P_{fa} de kans op een false-alarm, x de intensiteit of het vermogen van een sample, I de onderliggende intensiteit zonder speckle (het gemiddelde van x), en $P(x|I)$ de gamma verdeling van x gegeven I [de Vries 1995]. De relatie tussen de standaard deviatie σ_x en het gemiddelde van x wordt gegeven door vergelijking (5). Dit geldt zowel voor de oorspronkelijke kanalen HH, HV en VV, als voor de resultaten van de polarimetrische filters gegeven in paragraaf 4.1.

Uit vergelijking (20) blijkt dat de CFAR detector gebaat is bij een zo hoog mogelijke target-to-clutter ratio (t/c ratio: $x_t - \mu_c$) en een zo klein mogelijke standaard deviatie (σ_c). Anders gezegd; een CFAR detector werkt het best wanneer voor een doel geldt dat de t/c ratio gedeeld door de standaard deviatie (deflection ratio) maximaal is. De in paragraaf 4.1 beschreven filters als het PWF reduceren alleen de standaard deviatie van de achtergrond. Er bestaan ook filters die ontworpen zijn om de t/c ratio te vergroten [Novak 1989, Verbout 1992]. Het PWF levert echter een hogere deflection ratio op dan al deze filters [Novak 1992, Verbout 1992] en is eenvoudiger van opzet. Dit is ook de reden waarom deze filters niet zijn uitgewerkt in paragraaf 4.1.

Order-statistics CFAR detector

Bij order-statistics zijn de samples van een verdeling gerangschikt naar de grootte van de waarde [Rohling 1983]. Zo is bijvoorbeeld x_{30} de waarde die zich op 30% van het totale aantal bevindt. Een order-statistics CFAR detector wordt beschreven door [Novak 1991]:

$$\frac{x_t - x_m}{x_p - x_q} > K_{CFAR} \quad (22)$$

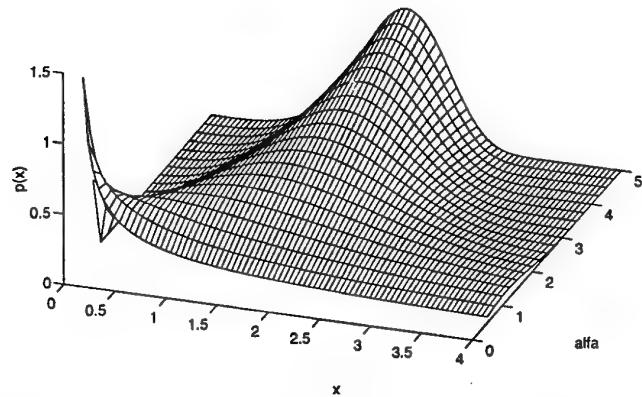
Hier is x_t de sample die getest wordt, x_m de mediaan (een benadering voor het gemiddelde, ook wel aangeduid met x_{50}) en $x_p - x_q$ een benadering van de standaard deviatie (bijvoorbeeld $x_{60} - x_{40}$). Het voordeel van order-statistics CFAR detectoren is dat zij robuuster zijn in het geval dat zich doelpixels tussen de clutterpixels bevinden. Dit kan voorkomen wanneer de template noodgedwongen klein is of wanneer zich meerdere doelen naast elkaar bevinden. De order-statistics CFAR detector kent twee varianten: (a) de hollow-stencil variant waarbij de template er uit ziet als in figuur 4.4 en (b) de solid-stencil variant waarbij alle pixels die zich bevinden tussen de rand en pixel x_t worden meegenomen in de berekening van het gemiddelde en de standaard deviatie.

Weibull detector

De pixel amplitudes van een homogeen gebied binnen een SAR beeld zijn Rayleigh verdeeld [Ulaby 1982]. Bevindt zich in dit gebied een doel waardoor het niet meer homogeen is, dan verandert die verdeling in een Weibull verdeling [Carlotto 1996]:

$$p(x) = \frac{\alpha}{m} \left(\frac{x}{m} \right)^{\alpha-1} \exp \left[-\left(\frac{x}{m} \right)^\alpha \right] \quad (23)$$

Hierin is x de amplitude van een sample, m een schaal parameter en α de Weibull parameter. Opgemerkt dient te worden dat in (21) x de intensiteit (het vermogen) voorstelt, het kwadraat van de amplitude. De pixel intensiteiten zijn overigens *niet* Rayleigh verdeeld. Vergelijking (23) geldt uitsluitend voor 1-look beelden. De Rayleigh verdeling is die van (23) voor $\alpha = 2$. Figuur 4.5 toont de Weibull verdeling voor $m = 2$ en verschillende waarden van α .



Figuur 4.5: De Weibull verdeling voor $m = 2$ en verschillende waarden van α .

Figuur 4.5 laat zien dat wanneer $\alpha = 1$, de Weibull verdeling exponentieel is. Wat opvalt is dat naarmate α groter wordt, de verdeling symmetrischer wordt en het maximum verschuift naar m . Voor de mediaan geldt:

$$x_m = \ln^{\frac{1}{\alpha}}(2)m \quad (24)$$

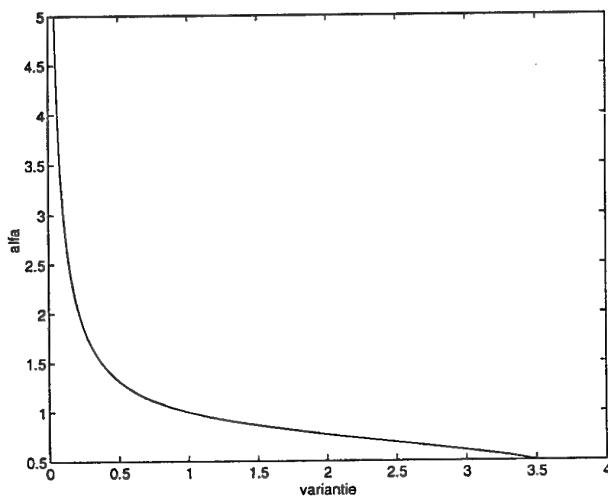
Het gemiddelde en de variantie (het kwadraat van de standaard deviatie) zijn moeilijker af te leiden. Tabel 4.3 toont de gemiddelden en varianties voor enkele waarden van α (analytische uitdrukkingen worden gegeven in [Levanon 1988]).

Tabel 4.3: Het gemiddelde en de variantie van de Weibull verdeling voor enkele waarden van α .

α	gemiddelde	variantie
0.25	$24m$	$39744 m^2$
0.5	$2m$	$20 m^2$
1	m	m^2
2	$\frac{m}{2}\sqrt{\pi}$	$(1 - \frac{\pi}{4})m^2$

In [Carlotto 1996] wordt voor een SAR beeld van 512×512 pixels α uitgerekend voor gebieden of subbeelden van 8×8 pixels. Dit wordt gedaan door het cumulatieve histogram van de subbeelden te vergelijken met vooraf uitgerekende cumulatieve histogrammen (voor $1 \leq \alpha \leq 4$, in 32 stappen). Het uitgerekende cumulatieve histogram dat het minste verschilt van dat van het subbeeld geeft α . Het blijkt dat een histogram van de uitgerekende α 's bimodaal is, dat wil zeggen, twee maxima vertoont, gescheiden door een minimum (bij $\alpha = 2.7$). Het deel rechts van het minimum wordt geassocieerd met natuurlijk terrein, het deel links hiervan met niet-natuurlijk (man-made) terrein. Bebouwde gebieden en een landingsbaan worden op deze manier gedetecteerd.

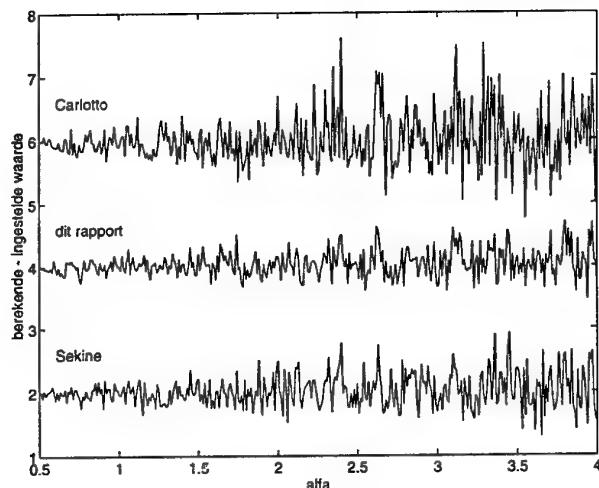
De bovenstaande manier van bepaling van α is wat omslachtig. Uit figuur 4.5 blijkt dat de variantie van de Weibull verdeling afneemt met toenemende α (de verdeling wordt "spitser"). Het is dus ook mogelijk α te schatten door de variantie te berekenen. Figuur 4.6 laat zien welk verband er is tussen α en de variantie voor $m=1$.



Figuur 4.6: Het verband tussen α en de variantie van de Weibull verdeling.

De curve is berekend door numerieke integratie voor $\alpha = 0.50, 0.55, 0.60, 0.65, \dots, 5.00$. Een moeilijkheid is dat er twee onbekende parameters zijn: α en m . Met

behulp van vergelijking (24), het feit dat de variantie recht evenredig is met m^2 (tabel 4.3) en een eenvoudig iteratief algoritme zijn ze beide te bepalen. In [Carlotto 1996] wordt dit probleem vermeden door ontrecht aan te nemen dat m de mediaan is. Deze benadering is vooral voor kleine α onjuist, zie vergelijking (24). Een derde manier om α te berekenen wordt gegeven in [Sekine 1992]. Hierin wordt het probleem gereduceerd tot een kleinste kwadraten fit van een rechte lijn aan de pixelwaarden van een subbeeld. De drie methoden ("Sekine", "dit rapport" en "Carlotto") zijn met gesimuleerde Weibull verdeelde data getest. Figuur 4.7 toont de resultaten voor $m=10$ en $\alpha = 0.50, 0.51, 0.52, \dots, 4.00$. De drie curven zijn het verschil tussen de berekende en de ingestelde waarden (er is een offset van 2, 4 en 6 toegepast). Een maat voor de nauwkeurigheid van een methode is de som van de absolute verschillen uit de figuur. De genormeerde sommen zijn 1.2 (Sekine), 1.0 (dit rapport) en 2.1 (Carlotto). De methode voorgesteld in dit rapport is dus het nauwkeurigst. Bovendien is het de snelste methode: de genormeerde rekentijden zijn 5.3 (Sekine), 1.0 (dit rapport) en 14 (Carlotto).



Figuur 4.7: Vergelijking van de drie methoden om α te schatten.

Resultaten

Bij de implementatie van de CFAR detectoren is gekozen voor een template van 21×21 pixels, ongeveer $32 \text{ m} \times 32 \text{ m}$. Deze template bleek het beste compromis tussen de omvang van de doelen, de omgeving en de pixelafmeting. Aangenomen werd dat een totaal aantal pixels van 80 een voldoende betrouwbaar resultaat zou opleveren voor het gemiddelde en de standaard deviatie. Dit aantal geldt voor de hollow-stencil detectoren waaronder de klassieke CFAR detector. Een solid-stencil van 21×21 pixels bevat totaal 440 clutterpixels. Bij de order-statistics detectoren is nagegaan welke order-statistics de beste benaderingen gaven voor het gemiddelde en de standaard deviatie. Voor de hollow-stencil variant bleek het beste criterium:

$$\frac{x_t - x_{50}}{x_{85} - x_{15}} > K_{CFAR} \quad (25)$$

Voor de solid-stencil variant bleek dit:

$$\frac{x_t - x_{50}}{x_{80} - x_{20}} > K_{CFAR} \quad (26)$$

De afstand in de noemer van de solid-stencil variant is kleiner dan bij de hollow-stencil variant. Dit laat zich verklaren door het feit dat de clutterpixels van de solid-stencil variant meer doelpixels bevatten bij de aanwezigheid van een doel in het centrum. Voor alle CFAR detectoren is gekozen voor $K_{CFAR} = 9.5$ omdat deze visueel het beste overzicht gaf van de doelen. Met behulp van (21) en de gamma intensiteit verdeling [de Vries 1995] is uitgerekend wat de false-alarm kansen zijn voor verschillende number-of-looks:

Tabel 4.4: De kans op een false-alarm voor verschillende number-of-looks, $K_{CFAR} = 9.5$.

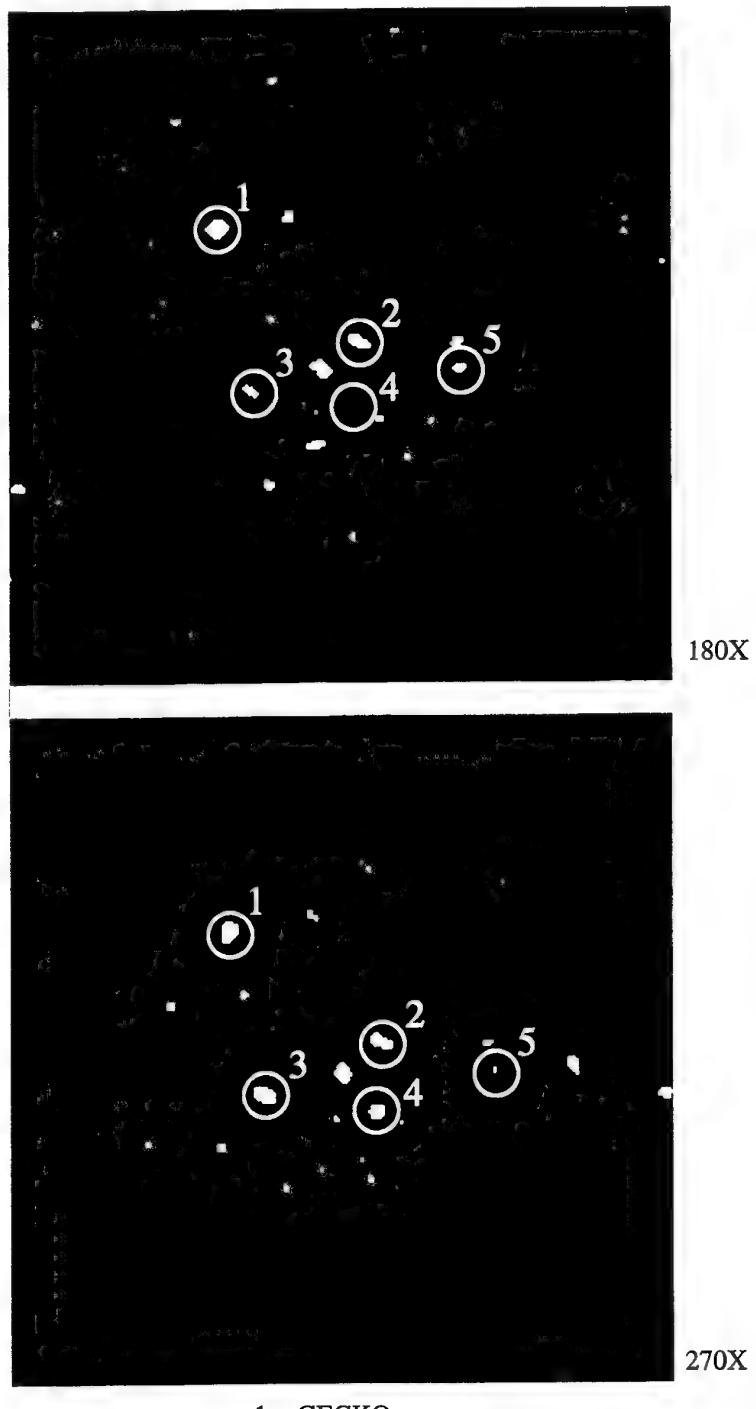
ENL	P_{fa}	percentage
3	10^{-6}	0.0001 %
8	10^{-8}	0.000001 %
20	10^{-10}	0.00000001 %

Opgemerkt dient te worden dat de waarden van tabel 4.4 zijn berekend op basis van de speckle. Het werkelijke aantal false-alarms is hoger omdat er ook objecten worden gedetecteerd waarin men niet is geïnteresseerd. Uit tabel 4.4 blijkt dat de kans op een false-alarm afneemt naarmate het aantal looks toeneemt. Vergelijken we deze resultaten met die uit tabel 4.2 dan zien we bijvoorbeeld dat het PWF de kans op een false-alarm ongeveer 100 × verkleint.

Bijlage C toont de resultaten van de klassieke CFAR detector (20) en de order-statistics detectoren (25) en (26), alle drie met $K_{CFAR} = 9.5$, voor alle filters besproken in paragraaf 4.1. Hierbij zijn de gedetecteerde pixels afgebeeld op de originele maar donkerder gemaakte beelden. Ook hieruit blijkt dat de kans op een false-alarm afneemt naarmate het aantal looks toeneemt. Vergelijken we beide hollow-stencil CFAR detectoren dan zien we dat de order-statistics detector minder false-alarms genereert dan de klassieke detector. De order-statistics detector is dan ook robuuster, maar de oorzaak kan ook liggen in de keuze van benadering van de standaard deviatie. Hierdoor kan de kans op een false-alarm voor deze detector lager zijn. Het verschil tussen beide order-statistics CFAR detectoren is klein. De solid-stencil variant lijkt iets beter te werken dan de hollow-stencil variant. Een oorzaak hiervan kan zijn het verschil in het aantal achtergrond samples (respectievelijk 440 en 80) en daarmee de betrouwbaarheid van het gemiddelde en de standaard deviatie. Een waarschijnlijker oorzaak is het verschil in afstand in de noemer van vergelijking (25) en (26) als benadering voor de standaard deviatie. Het sorteren van 440 pixels (order-statistics) duurt wel langer dan van 80 pixels. Op basis van de resultaten gaat de voorkeur uit naar de order-statistics detectoren.

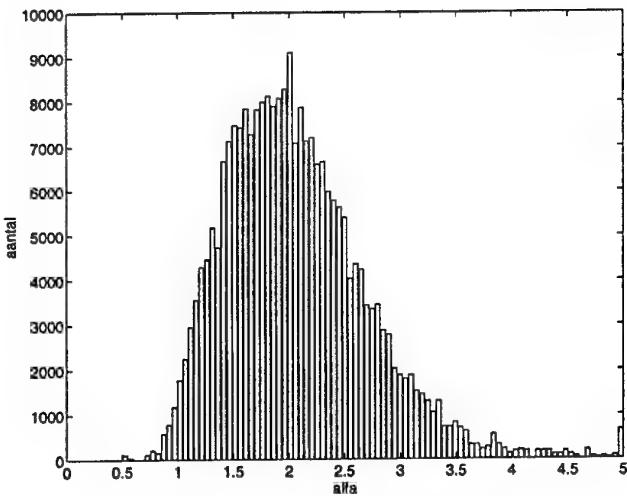
In bijlage C zien we ook dat het Wavelet Shrinkage filter het beeld enigszins heeft aangetast zodat een enkel doel niet meer gedetecteerd wordt. Het meest optimale filter voor detectie lijkt het PWF zijn. Het DIWF is een goede tweede maar geldt specifiek voor het dihedral beeld. Om na te gaan wat een CFAR detector precies detecteert is er ook op pixel niveau naar deze beelden gekeken. Figuur 4.8 toont een uitvergroting van het resultaat van de hollow-stencil order-statistics CFAR detector op de PWF beelden van de PHARUS opnamen 180X en 270X. In de eerste opname worden vier van de vijf doelen gedetecteerd, in de tweede alle vijf de doelen. Het aantal false-alarms in beide is ongeveer gelijk. De meeste ervan blijken te worden veroorzaakt door bomen, zie Bijlage A. Op basis van figuur 4.8 kan niet direct worden bepaald welke objecten (een groep ogenschijnlijk bij elkaar horende pixels) een voertuig zijn en welke niet. De pixels zijn echter goed gegroepeerd en er kan een uitspraak worden gedaan over de afmeting en soms ook over de richting van een gedetecteerd object.

Voor de Weibull detector zijn de PHARUS opnamen opnieuw verwerkt, zonder multi-looking, omdat deze verdeling alleen geldt voor 1-look data. De α -waarden werden bepaald in gebieden van 5×5 pixels, met behulp van de eerder beschreven optimale methode ("dit rapport"). Figuur 4.9 toont het histogram van α voor het HH-beeld van opname 180X. De verdeling lijkt een licht scheve normale verdeling, met het maximum bij $\alpha \approx 2$. Dit laatste betekent dat de pixelwaarden Rayleigh verdeeld zijn, zoals valt te verwachten voor een 1-look HH beeld. Er is geen sprake van een bimodale verdeling zoals in [Carlotto 1996], waarschijnlijk doordat onze beelden maar zeer weinig doelen bevatten. Bijlage C bevat de resultaten van de Weibull detector voor HH, HV en VV. De gedetecteerde man-made gebieden zijn op eenzelfde manier weergegeven als bij de CFAR detectoren. Hierbij zijn gebieden van 5×5 pixels met een α lager dan 0.75-1.05 als doelen aangemerkt. De drempel werd zo gekozen dat er ongeveer 10 doelen gedetecteerd werden. Te zien valt dat geen enkel doel door de Weibull detector wordt gedetecteerd. Er worden alleen maar false-alarms waargenomen. De Weibull detector is dus ongeschikt voor het detecteren van doelen met PHARUS data. Wat opvalt aan de 1-look beelden is dat er meerdere puntdoelen te onderscheiden zijn binnen de grenzen van de voertuigen, zie ook figuur 4.8. Omdat op deze data geen multi-looking is toegepast is de azimuth resolutie 1.2 m gebleven, zie ook hoofdstuk 3.



- 1 = GECKO
- 2 = TLAR
- 3 = ASTROSS
- 4 = MTLB
- 5 = ZSU 23-4

Figuur 4.8: De resultaten van de hollow-stencil order-statistics CFAR detector op PWF data.



Figuur 4.9: Histogram van α van opname 180X HH.

4.3 Herkenning

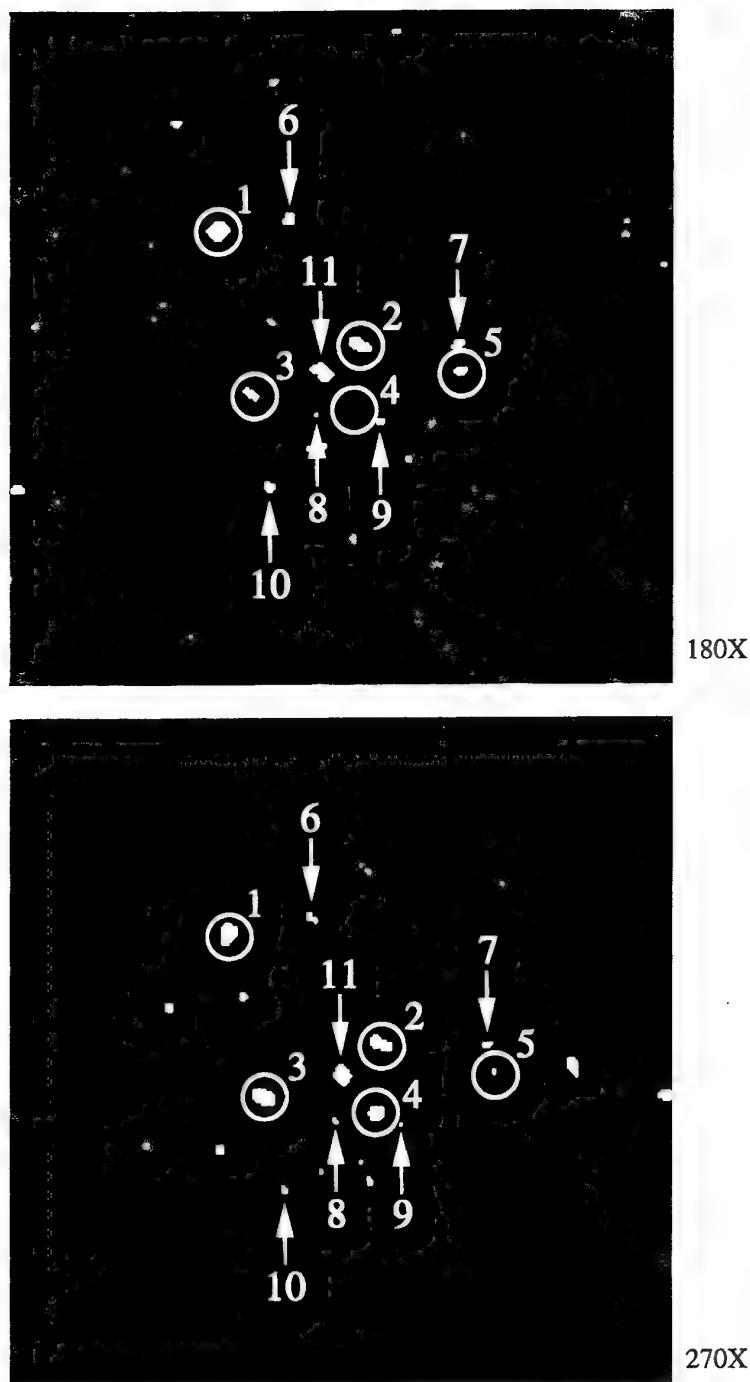
Herkenning is het maken van onderscheid tussen de gedetecteerde doelen. Daarbij gaat het om het onderscheid tussen stationaire militaire voertuigen en false-alarms en tussen de voertuigen onderling. Belangrijk hierbij zijn de kenmerken of features, op basis waarvan een gedetecteerd doel geclasseerd kan worden. In deze paragraaf worden twee methoden uitgewerkt. Hiertoe is op basis van figuur 4.8 een verzameling bepaald van bekende doelen en false-alarms bepaald die zoveel mogelijk in beide opnamen (180X en 270X) voorkwamen, zie figuur 4.10.

Omdat de pixels per gedetecteerd object goed gegroepeerd zijn, kan een uitspraak worden gedaan over de afmetingen en soms ook de richting van de objecten. Zij zijn gegeven in tabel 4.5. De lengte is bepaald door het aantal pixels op te meten in de ogenschijnlijke oriëntatie richting. De oriëntatie is ingedeeld in vier klassen: -45°, 0°, 45° en 90°. Er wordt dus geen onderscheid gemaakt tussen de voor- en achterkant van een voertuig. Is een waarde niet gegeven dan is het object niet gedetecteerd (object 4 opname 180X) of te klein om een richting te kunnen bepalen. De identiteit van object 6 t/m 10 is vastgesteld met behulp van de ground-truth data, zie Bijlage A. Object 11 kwam hier niet in voor maar bleek een mobiel verhoogd platform voor het maken van opnamen met radiometers [Bartlett 1997]. Wordt alleen de lengte in ogenschouw genomen dan kunnen we alle objecten van minimaal 7 m lang beschouwen als een voertuig. Dat dit ook mis kan gaan bewijst object 5 in opname 270X. Kleinere voertuigen zullen over het hoofd worden gezien. Bovendien verschillen de lengtes van object 4 en 5 aanzienlijk tussen beide opnamen. De oorzaak hiervan is de aard van het voertuig en de belichtingsrichting

(loodrecht op de vliegrichting) hiervan; enkele graden verschil kan al een volledig andere signatuur opleveren [de Vries 1998]. Een verschil in oriëntatie van een object tussen beide opnamen kan ook een criterium zijn om een object uit te sluiten van de verzameling voertuigen. Dit gaat echter wederom mis voor object 5 in opname 270X. Het is begrijpelijk dat met de minimale informatie die het CFAR beeld oplevert geen betrouwbare classificatie gedaan kan worden. Er is meer informatie nodig.

Een tweede methode is herkenning op basis van de covariantie matrix. Het PWF CFAR beeld van figuur 4.8 of 4.10 wordt hierbij gebruikt als "cue" voor de gemiddelde covariantie matrix van een object. Op basis van deze matrices kan onderscheid worden gemaakt tussen dihedral/trihedral structuren en natuurlijke objecten. Voertuigen en andere kunstmatige (man-made) objecten bezitten vaak meerder rechte hoeken die een dihedral of trihedral kunnen vormen. Tabel 4.6 toont de gemiddelde covariantie matrices van dezelfde objecten. Zij zijn verkregen door rond het ogenschijnlijke middelpunt van een object 3×3 covariantie matrices te middelen. Dit is nodig omdat vooraf geen onderscheid gemaakt kan worden; de covariantie matrix van een natuurlijk object is meestal een stochastische variabele met een gemiddelde en standaard deviatie. Opvallend voor dihedrals en trihedrals is dat de HV component (ε) 0 of in ieder geval erg klein moet zijn. Uit tabel 4.6 blijkt dat dit ook nogal eens voorkomt bij bomen. Een ander kenmerk voor dihedrals en trihedrals is de fase van de correlatie coëfficiënt (ρ). Voor een goed gecalibreerd beeld horen zij zeer uitgesproken te zijn. Uit tabel 4.6 blijkt dit ook weer bij bomen voor te komen. De uitgesprokenheid correspondeert overigens wel met de compositie van het DIWF en TRIWF in figuur 4.3. Vooral in opname 270X is duidelijk te zien dat object 1, 6, en 11 een dihedral reflectie aangeven (duidelijk rode kleur die correspondeert met DIWF). De resterende covariantie matrix parameters doen ook weinig verschil vermoeden tussen de voertuigen en bomen. Een oorzaak van het kleine verschil tussen de covariantie matrices kan zijn dat het aantal matrices dat wordt gemiddeld (3×3) niet voldoende is voor een betrouwbaar gemiddelde. Het verkrijgen van meer samples en een betere resolutie is echter niet mogelijk zonder de radar aan te passen.

Uit de twee behandelde voorbeelden blijkt in ieder geval dat classificatie van de doelen moeilijk is bij de huidige resolutie. Door gebrek aan tijd binnen dit project is niet verder gekeken naar andere methoden. Dit is wel gebeurd in het vervolg op dit onderzoek [de Vries 1998]. Hierbij is ook gekeken naar data met een hogere resolutie.



Figuur 4.10: De verzameling gedetecteerde objecten (bekende doelen en false-alarms) die is gebruikt voor het testen van enkele herkenningsmethoden. De nummers corresponderen met tabel 4.5. Het uitgangspunt zijn de resultaten van de hollow-stencil order-statistics CFAR detector op PWF data (figuur 4.8).

Tabel 4.5: De berekende lengtes en richtingen van de gedetecteerde objecten 1 t/m 11.

target	identity	180X		270X	
		length	direction	length	direction
1	GECKO	10 m	45°	12 m	45°
2	TLAR	12 m	-45°	12 m	-45°
3	ASTROSS	8 m	-45°	13 m	-45°
4	MTLB	-	-	8 m	90°
5	ZSU 23-4	7 m	90°	3 m	0°
6	tree	6 m	45°	6 m	-45°
7	tree	6 m	45°	6 m	90°
8	tree	2 m	-	4 m	-45°
9	tree	5 m	90°	2 m	-
10	tree	5 m	-45°	5 m	0°
11	platform	11 m	-45°	9 m	-45°

Tabel 4.6: De 3×3 gemiddelde covariantie matrices van de gedetecteerde objecten 1 t/m 11. Opgenomen zijn ook de matrices van een dihedral ($\alpha = 0^\circ$) en een trihedral [Freeman 1992].

target	identity	180X				270X			
		ε	γ	$ \rho $	$\angle\rho$	ε	γ	$ \rho $	$\angle\rho$
-	dihedral	0	1	1	180°	0	1	1	180°
-	trihedral	0	1	1	0°	0	1	1	0°
1	GECKO	0.27	1.20	0.35	-114°	0.13	1.47	0.84	158°
2	TLAR	0.02	0.53	0.91	-27°	0.14	1.13	0.58	-7°
3	ASTROSS	0.04	0.54	0.68	-56°	0.12	1.77	0.61	66°
4	MTLB	0.09	1.31	0.65	-22°	0.26	5.59	0.72	-1°
5	ZSU 23-4	0.03	0.16	0.66	139°	0.16	0.65	0.76	90°
6	tree	0.23	0.49	0.71	-33°	0.67	1.90	0.52	129°
7	tree	0.22	1.24	0.72	-65°	0.20	0.81	0.64	-61°
8	tree	0.17	0.58	0.39	-17°	0.05	0.97	0.79	-56°
9	tree	0.04	0.33	0.69	31°	0.86	1.26	0.77	-3°
10	tree	0.34	1.41	0.35	-30°	0.07	0.79	0.80	-3°
11	platform	0.31	1.48	0.81	52°	0.09	0.34	0.74	-142°

5. Conclusies en aanbevelingen

Binnen dit onderzoek is gekeken naar het opsporen van stationaire militaire voertuigen met behulp van PHARUS, een polarimetrische SAR. Doelopsporing bestaat uit drie stappen: pre-processing, detectie en herkenning. In de pre-processing wordt de data zoveel mogelijk ontdaan van speckle ruis.

Diverse polarimetrische speckle reductie algoritmen zijn onderzocht. Het beste bleek het PWF (Polarimetrisch Whitening Filter). Het DIWF (Dihedral Whitening Filter) bleek een goede tweede met betrekking tot de detectie van dihedral structuren. Het Span en OIS (Optimal Intensity Sum) presteerden minder maar bleken een goed alternatief door hun eenvoud. Het enige niet polarimetrische filter dat werd onderzocht, het Wavelet Shrinkage filter, zorgde voor een kleine verbetering bovenop het PWF maar bleek de resolutie aan te tasten.

Opvallend goed waren de resultaten van de CFAR detectoren op PHARUS data; alle doelen (op één doel in één beeld na) werden gedetecteerd en het aantal false-alarms bleef beperkt. De beste detector bleek de order-statistics CFAR detector. De voorkeur gaat hierbij uit naar de "hollow stencil" variant omdat deze sneller is. De Weibull detector miste alle doelen. Het maken van onderscheid tussen de militaire voertuigen onderling en tussen false-alarms, bleek moeilijk. Op basis van het CFAR beeld kon een uitspraak worden gedaan over de afmetingen en de oriëntatie van een gedetecteerd object. Volledige classificatie bleek echter niet mogelijk, ook niet op basis van de polarimetrische eigenschappen (covariantie matrix). De belangrijkste oorzaak hiervan is de resolutie (circa 3.5 m × 5.0 m).

Het detecteren van doelen met PHARUS blijkt dus succesvol. De polarimetrische mode draagt vooral bij in de reductie van speckle. Herkenning vergt echter een hogere resolutie en nader onderzoek naar classificatie methoden. Een deel van dit onderzoek is reeds uitgevoerd [de Vries 1998], waarbij is gekeken naar polarimetrisch gefilterde data met een hogere resolutie dan PHARUS op dit moment biedt. Aanbevolen wordt ook te kijken naar de polarimetrische eigenschappen van de hoge resolutie SAR data die is opgenomen tijdens dezelfde proefnemingen [Bartlett 1997]. Deze data is reeds beschikbaar.

Doelopsporing kan bovendien het beste worden uitgevoerd met meerdere sensoren waarbij PHARUS aangeeft waar zich mogelijke doelen bevinden (cueing). Met andere sensoren kan dan worden onderzocht wat de aard van deze doelen is. Voorbeelden van goede aanvullende sensoren zijn thermisch-infrarood (TIR), laser-radar en multispectrale scanners. Het voordeel van SAR en laser-radar is dat zij ook in staat zijn hoogte of diepte weer te geven, informatie die van groot belang kan zijn bij herkenning.

6. Referenties

- [1] Bartlett, L.H., and Saunders, T.H, 1997, "Swynnerton Ground Truth Data", NATO Panel 3 RSG-20 MIMEX Trials Report, DRA/LS/LS2/WP97004, November 1997, Defence Evaluation and Research Agency, Farnborough, United Kingdom.
- [2] Broek, A.C. van den, and, Groot, J.S., 1993, "Intercalibration of Satellite and Airborne SAR: A Comparative Study of ERS-1 AND AIRSAR/PHARS SAR Data", *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, No. 3, August 1993, pp. 209-217.
- [3] Buitenhuis, H.J., en Clevers, J.G.P.W. (redactie), 1990, *Remote Sensing, theorie en toepassingen van landobservatie (Dynamiek, inrichting en beheer van landelijke gebieden, deel 2)*, Uitgeverij Pudoc, Wageningen, Nederland.
- [4] Carlotto, M.J., 1996, "Detecting man-made features in SAR imagery", *Proceedings of IGARSS '96, 27-31 May 1996, Lincoln, Nebraska*, pp. 34-36.
- [5] Chui, C.K. (editor), 1992, *Wavelets: A Tutorial in Theory and Applications*, Academic Press, San Diego, CA.
- [6] Dekker, R.J., 1997-1, "Tussenrapportage PHARUS calibratie activiteiten", interne rapportage, 12 mei 1997, TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium, Den Haag, Nederland.
- [7] Dekker, R.J., 1997-2, "Tussenrapportage PHARUS calibratie activiteiten (2)", interne rapportage, 10 juli 1997, TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium, Den Haag, Nederland.
- [8] Dekker, R.J., and Broek, A.C. van den, 1998, "Calibration of Polarimetric PHARUS Data", *CEOS SAR Workshop, 3-6 February 1998, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands*.
- [9] Donoho, D.L., and Johnstone, I.M., 1994, "Ideal spatial adaption by wavelet shrinkage", *Biometrika*, Vol. 81, No. 3, pp. 425-455.
- [10] Donoho, D.L., 1995, "De-Noising by Soft-Thresholding", *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 41, No. 3, May 1995, pp. 613-627.
- [11] Freeman, A., 1992, "Polarization Effects and Multipolarization SAR", In *Fundamentals and Special Problems of Synthetic Aperture Radar (SAR)*, AGARD- LS-182, August 1992, NATO Advisory Group for Aerospace Research and Development, Neuilly-Sur-Seine, France, ref. 5, pp. 1-13.
- [12] Goldstein, G.B., 1973, "False-Alarm Regulation in Log-Normal and Weibull Clutter", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 9, No. 1, January 1973, pp. 84-92.
- [13] Guo, H., Odegard, J.E., Lang, M., Gopinath, R.A., Selesnick, I.W., and Burrus, C.S., 1994, "Wavelet based speckle reduction with application to SAR based ATD/R", *Proceedings of ICIP '94, Los Alamitos, California*, pp. 75-79.
- [14] Halsema, D. van, Dekker, R.J., Groeneveld, A.W., Groot, J.S., en Otten, M.P.G., 1998, "SAR voor surveillance en reconnaissance", TNO rapport

FEL-97-A318, TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium, Den Haag, Nederland.

- [15] Hoekman, D.H., 1991, "Speckle Ensemble Statistics of Logarithmically Scaled Data", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 29, No. 1, January 1991, pp. 180-182.
- [16] Hoogeboom, P., Greidanus, H., Koomen, P.J., and Pouwels, H., 1994, "PHARUS: An Autonomous Airborne SAR Capability", *Symposium on Satellite and Airborne Synthetic Aperture Radar*, 28 November 1994, Jakarta, Indonesia.
- [17] Larson, V., and Novak, L., 1995, "Polarimetric subspace target detector for SAR data based on the Huynen dihedral model", *Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery II*, 19-21 April 1995, SPIE, Vol. 2487, pp. 235-250.
- [18] Levanon, N., 1988, *Radar Principles*, John Wiley & Sons, New York, pp. 33-34.
- [19] Li, F.K., Croft, C., and Held, D.N., 1983, "Comparison of Several Techniques to Obtain Multiple-Look SAR Imagery", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 21, No. 3, July 1983, pp. 370-375.
- [20] Liu, G., Huang, S.J., Torre, A., and Rubertone, F., 1995, "Optimal Speckle Reduction in Multi-look Polarimetric SAR Image", *Proceedings of IGARSS '95*, 10-14 July 1995, Firenze, Italy, pp. 664-666.
- [21] Moreira, A., 1991, "Improved Multilook Techniques Applied to SAR and SCANSAR Imagery", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 29, No. 4, July 1991, pp. 529-534.
- [22] Nasr, J.M., and Fernin, Ph., 1990, "A comparison of the detection performances obtained with a fully polarized SAR and a dual polarized SAR (HH, VV)", *Proceedings of IGARSS '90*, 20-24 May 1990, Washington D.C., pp. 317-320.
- [23] Nasr, H., 1996, *Course on Automatic Target Detection and Recognition*, 2-4 December 1996, Inter-Disciplinary Scientific Solutions Ltd., London, United Kingdom.
- [24] Novak, L.M., Sechtin, M.B., and Cardullo, M.J., 1989, "Studies of Target Detection Algorithms That Use Polarimetric Radar Data", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 25, No. 2, March 1989, pp. 150-165.
- [25] Novak, L.M., and Burl, M.C., 1990, "Optimal Speckle Reduction in Polarimetric SAR imagery", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 26, No. 2, March 1990, pp. 293-305.
- [26] Novak, L.M., and Hesse, S.R., 1991, "On the Performance of Order-Statistics CFAR Detectors", *IEEE Conference Record of the 25th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Vol. 2, 1991, pp. 835-840.
- [27] Novak, L.M., 1992, "Target Detection Studies Using Fully Polarimetric Data Collected by the Lincoln Laboratory MMW SAR", *IEE International Conference on Radar*, 12-13 October 1992, Brighton, UK, pp. 167-170.

- [28] Novak, L.M., Burl, M.C., and Irving, W.W., 1993, "Optimal Polarimetric Processing for Enhanced Target Detection", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 29, No. 1, January 1993, pp. 234-243.
- [29] Otten, M.P.G., Groot, J.S., and Wouters, H.C., 1994, "Development of a Generic SAR Processor in The Netherlands", *Proceedings of IGARSS '94, 8-12 August 1994, Pasadena, California*, pp. 903-905.
- [30] Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., and Flannery, B.P., 1992, *Numerical Recipes in C (Second Edition)*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- [31] Quegan, S., 1990, "Interpolation and Sampling in SAR images", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 28, No. 4, July 1990, pp. 641-646.
- [32] Rohling, H., 1983, "Radar CFAR Thresholding in Clutter and Multiple Target Situations", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 19, No. 4, July 1983, pp. 608-621.
- [33] Sekine, M., 1992, "Weibull Distribution in Radar Polarimetry", In *Direct and Inverse Methods in Radar Polarimetry, Part I*, Boerner, W.M., et. al. (editors), Kluwer Academic Publishers.
- [34] Ulaby, F.T., Moore, R.K., and Fung, A.K., 1982, *Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Volume II: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- [35] Ulaby, F.T., Kouyate, F., Brisco, B., and Williams, T.H.L., 1986, "Textural Information in SAR Images", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 24, No. 2, March 1986, pp. 235-245.
- [36] Verbout, S.M., Netishen, C.M., and Novak, L.M., 1992, "Polarimetric Techniques for Enhancing SAR Imagery", *SPIE Vol. 1630, Synthetic Aperture Radar, 20-21 January 1992, Los Angeles, California*, pp. 141-173.
- [37] Vermeulen, B.C.B. en Otten, M.P.G., 1996, "PHARUS Far Field Measurements", TNO rapport FEL-A96-C292, december 1996, TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium, Den Haag, Nederland.
- [38] Vries, F.P.Ph. de, Dekker, R.J., and Willem, F.J., 1995, "Project PROSAR: report on satellite SAR processing activities in 1993 and 1994", TNO rapport FEL-94-A176, oktober 1995, TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium, Den Haag, Nederland.
- [39] Vries, F.P.Ph. de, 1998, "Detection and recognition of tactical targets in SAR imagery", TNO rapport FEL-97-A274, TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium, Den Haag, Nederland.
- [40] Zebker, H.A., and Zyl, J.J. van, 1991, "Imaging Radar Polarimetry: A Review", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 79, No. 11, November 1991, pp. 1583-1606.
- [41] Zyl, J.J. van, Burnette, C.F., Zebker, H.A., Freeman, A, and Holt, J., 1990, "Polcal user's manual (POLCAL version 2.0)", JPL D-7715, August 1990, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California.

7. Ondertekening

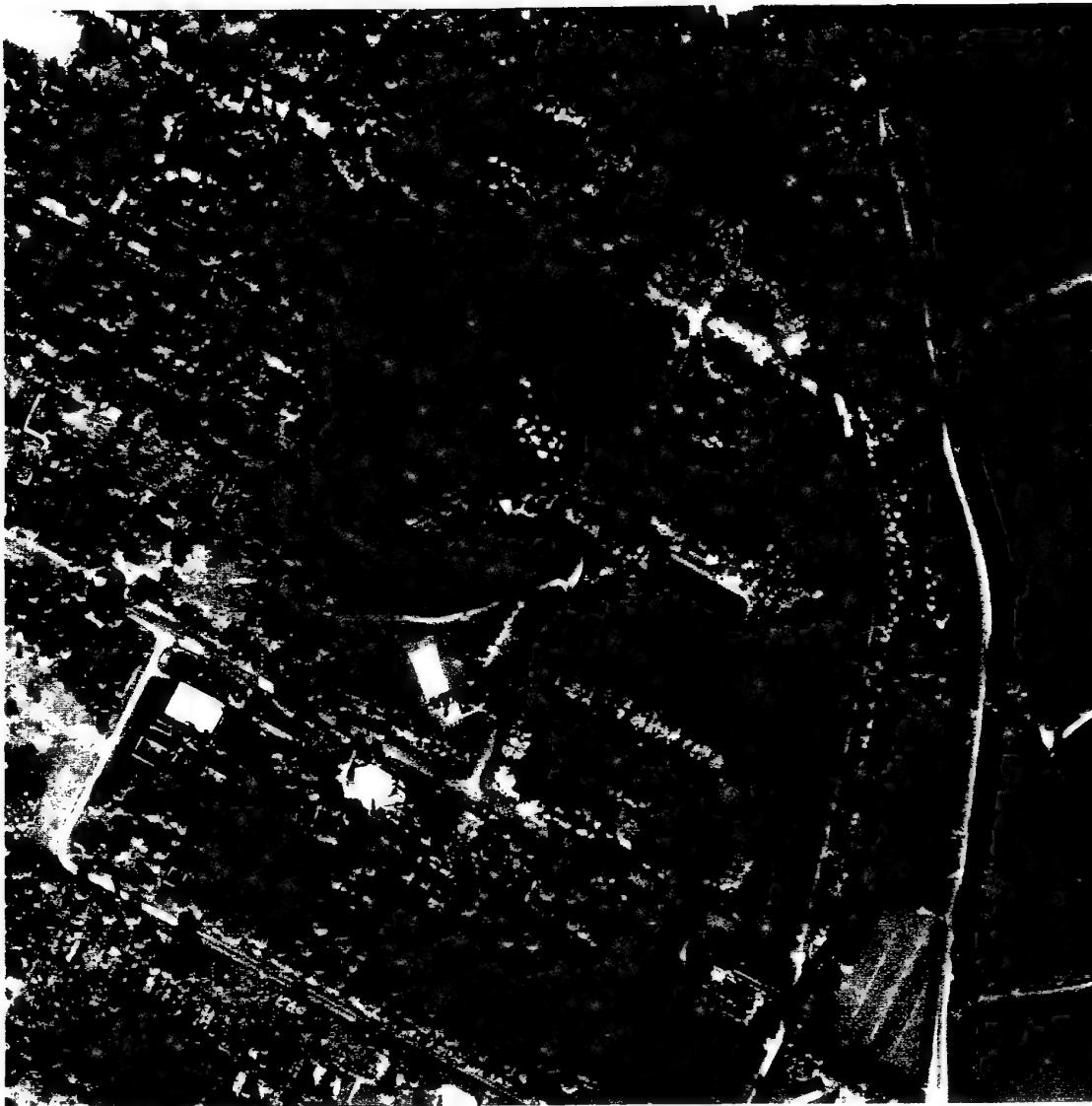


Ir. P. Hoogeboom
Groepsleider

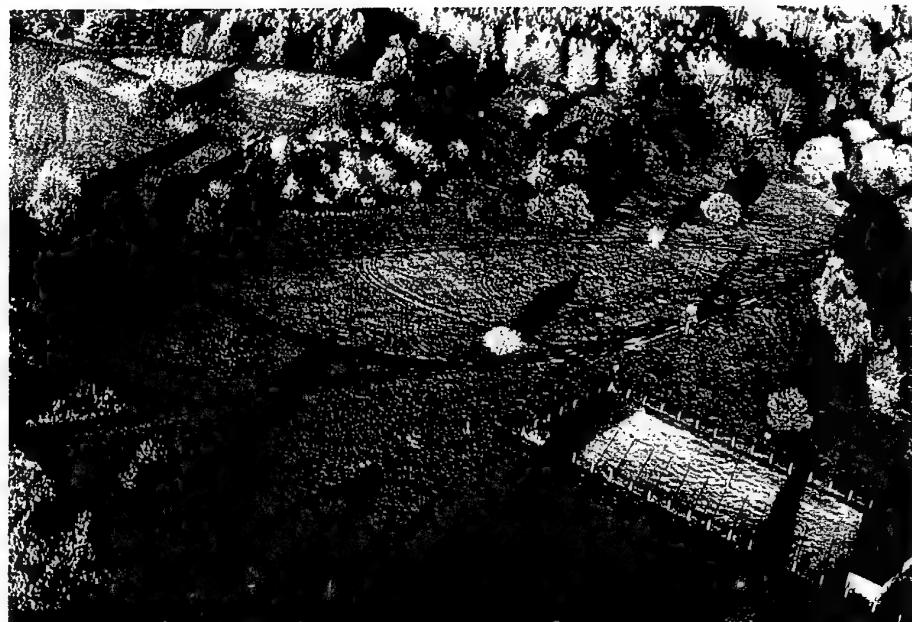


Ing. R.J. Dekker
Projectleider/Auteur

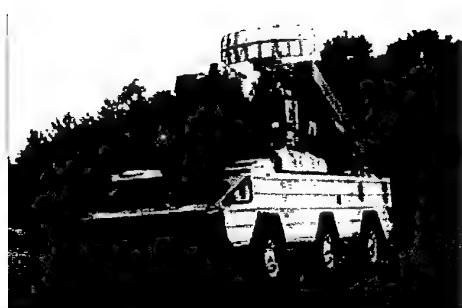
Bijlage A Ground-truth



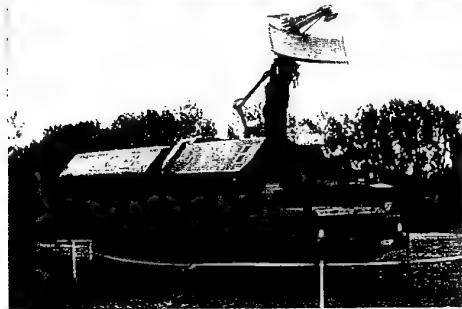
Figuur A.1: Luchtfoto van het gebied waar de voertuigen zijn opgesteld (zonder voertuigen) van november 1995, hoogte 6280 m.



Figuur A.2: Twee foto's van het gebied waar de voertuigen zijn opgesteld (zonder voertuigen), genomen vanuit een helikopter in de richting noord-oost (boven) en noord-west (onder).



GECKO



TLAR



ASTROSS

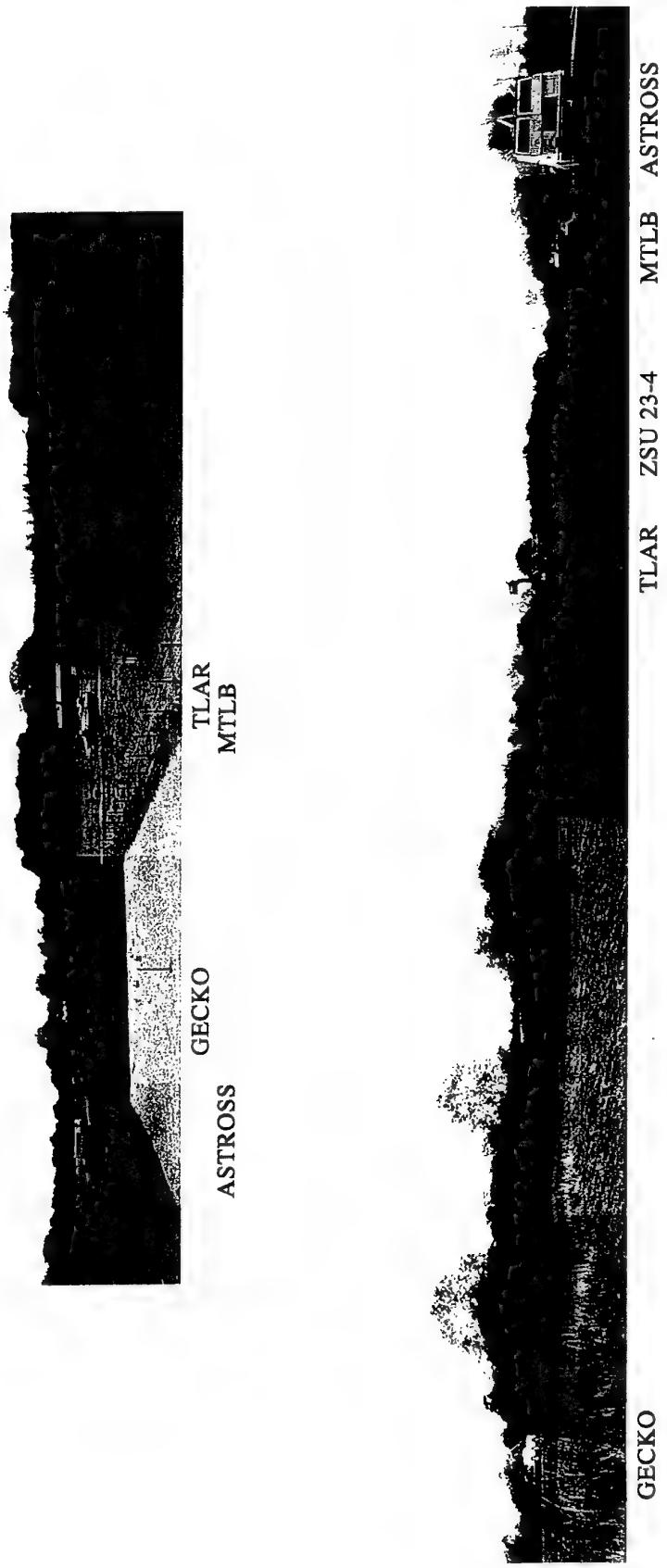


MTLB

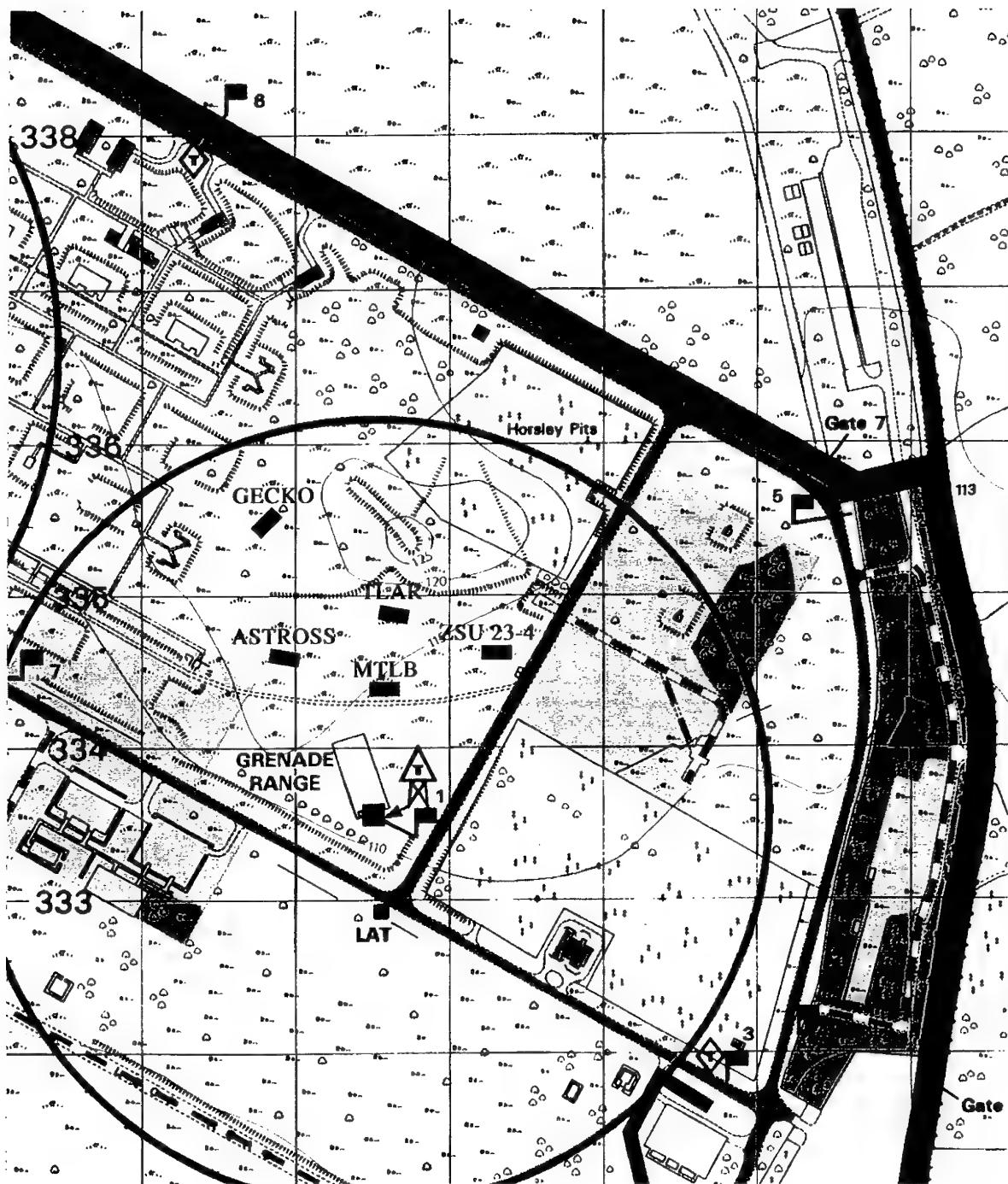


ZSU 23-4

Figuur A.3: Foto's van de opgestelde voertuigen.

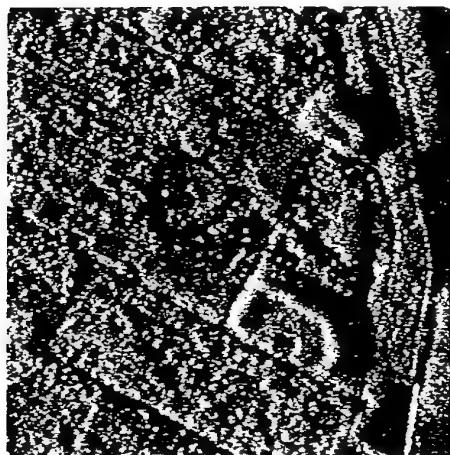


Figuur A.4: Panorama foto's van het gebied waar de voertuigen zijn opgesteld (met voertuigen).

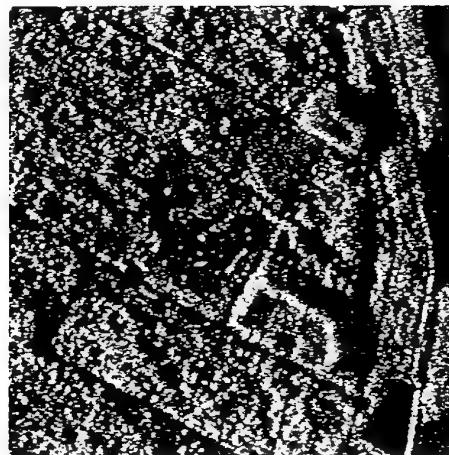


Figuur A.5: Kaart van het gebied waar de voertuigen zijn opgesteld (met voertuigen).

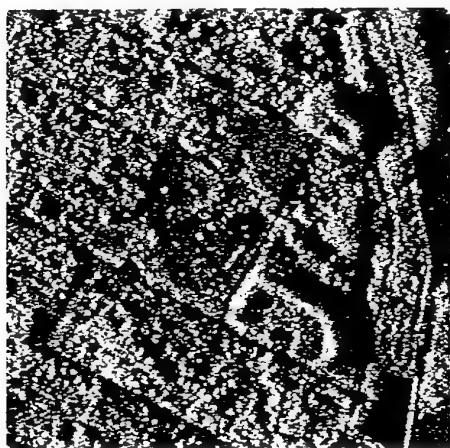
Bijlage B Resultaten filters



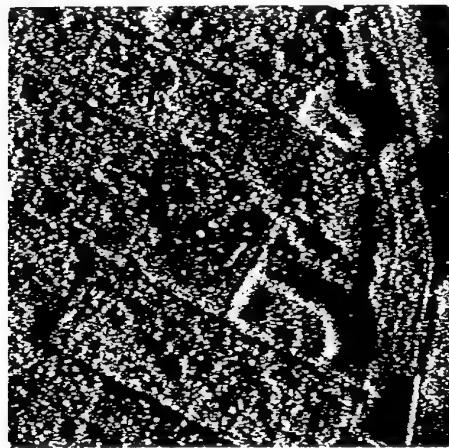
180X HH



180X HV



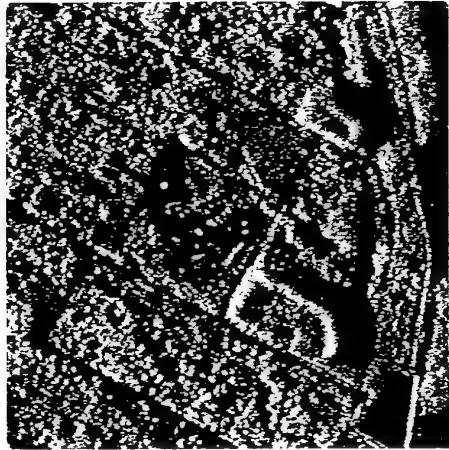
180X VV



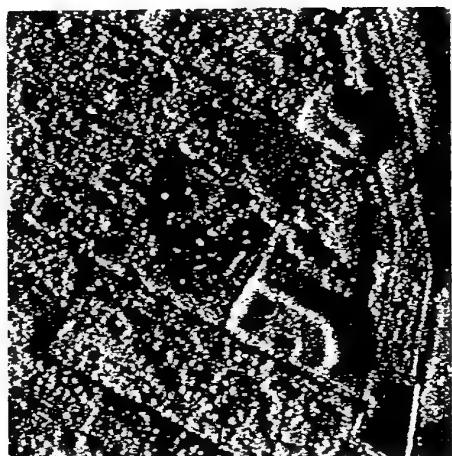
180X TRIWF



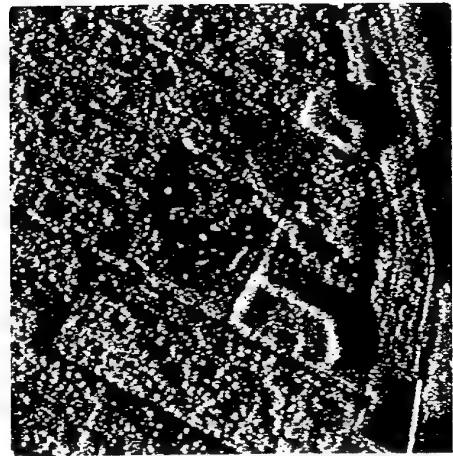
180X Dual



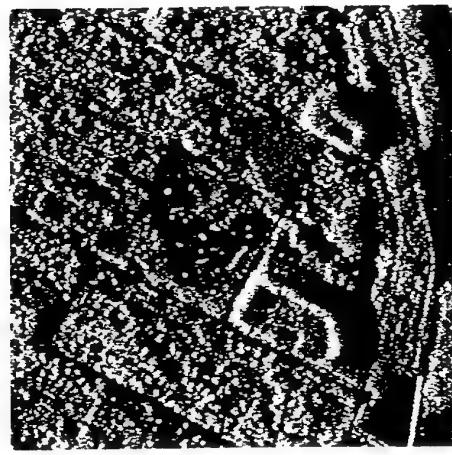
180X DIWF



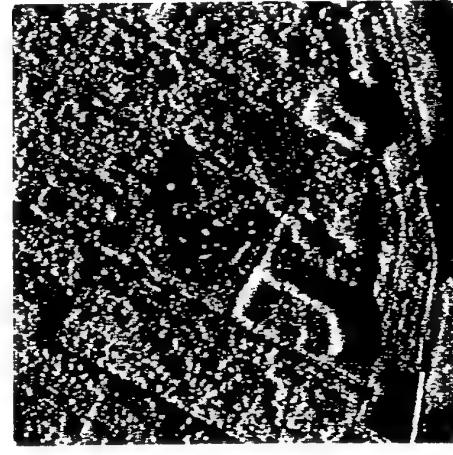
180X Span



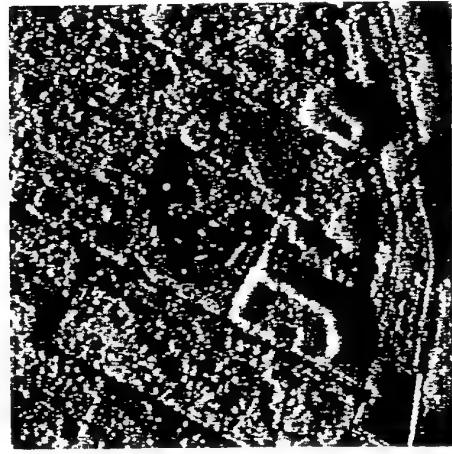
180X OIS



180X PWF



180X PWF+Wavelet 2.5σ



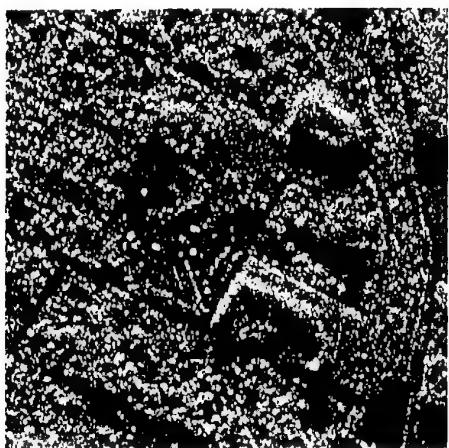
180X PWF+Wavelet 5.0σ



270X HH



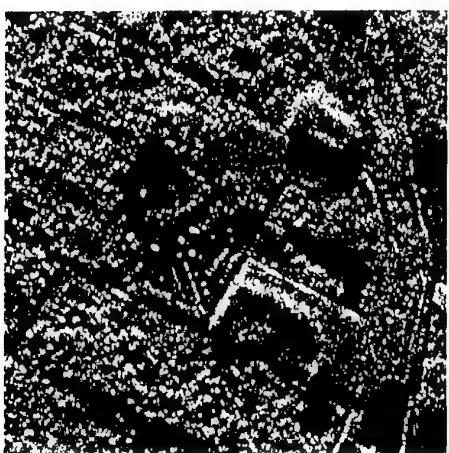
270X HV



270X VV



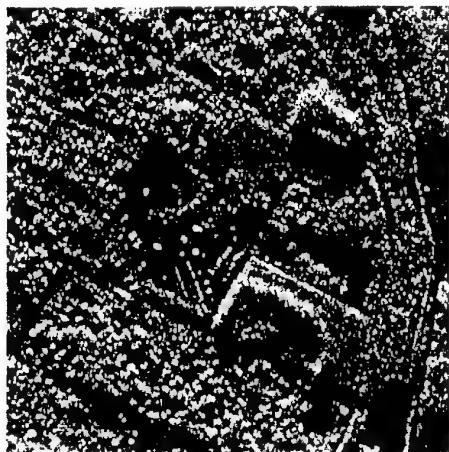
270X TRIWF



270X Dual



270X DIWF



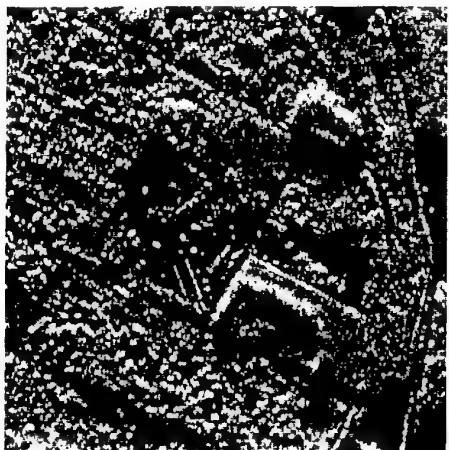
270X Span



270X OIS



270X PWF



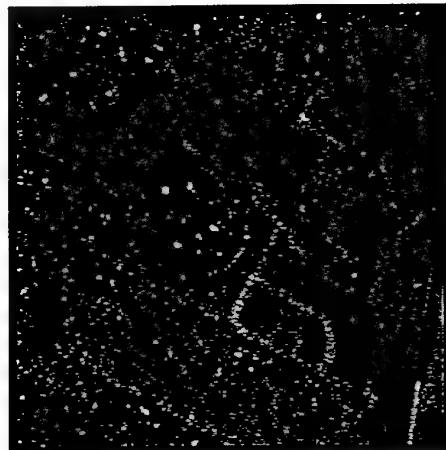
270X PWF+Wavelet 2.5 σ



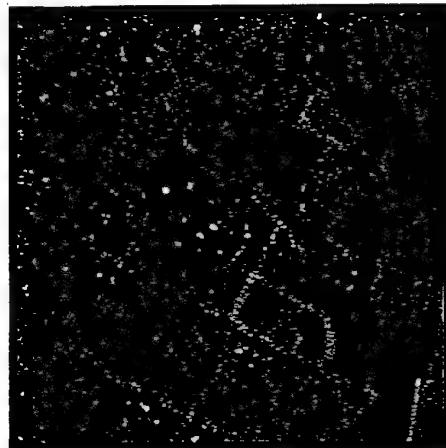
270X PWF+Wavelet 5.0 σ

Bijlage C Resultaten detectoren

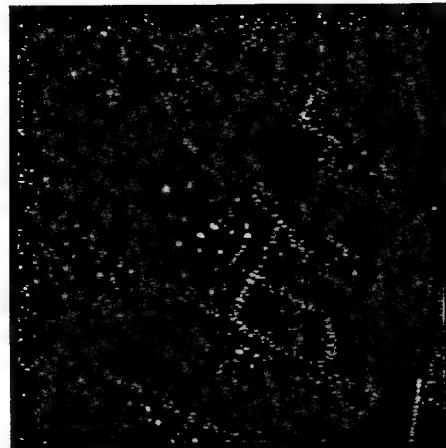
Classical CFAR



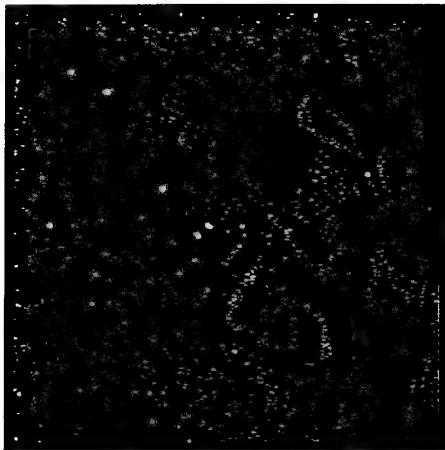
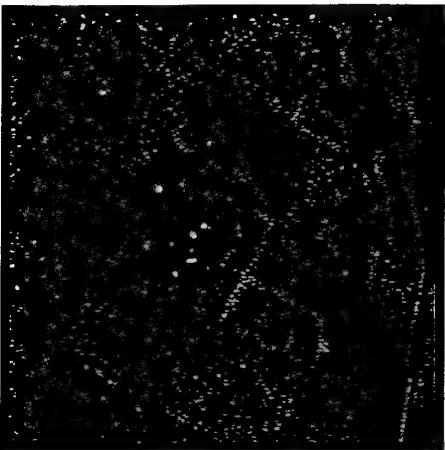
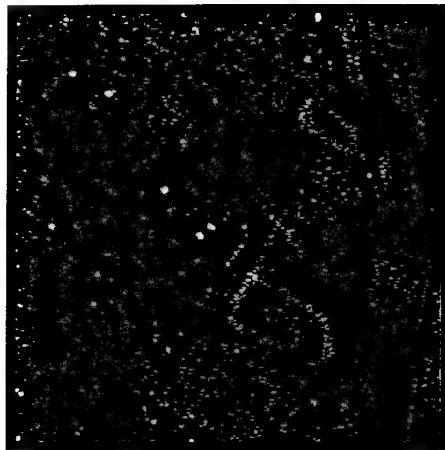
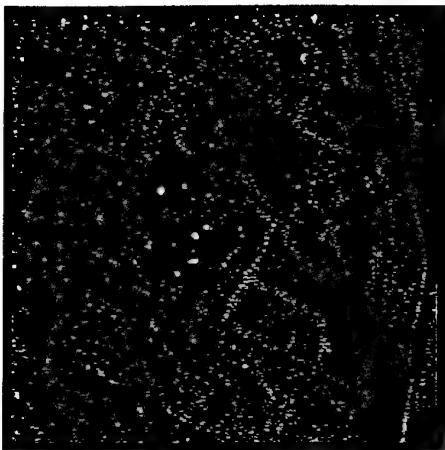
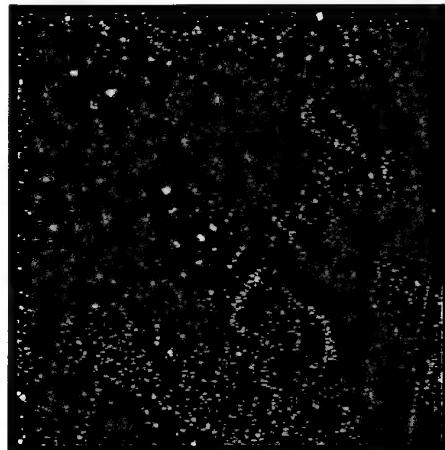
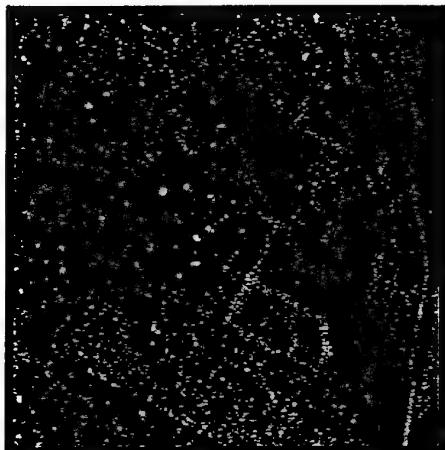
Order-statistics CFAR hollow-stencil



Order-statistics CFAR solid-stencil

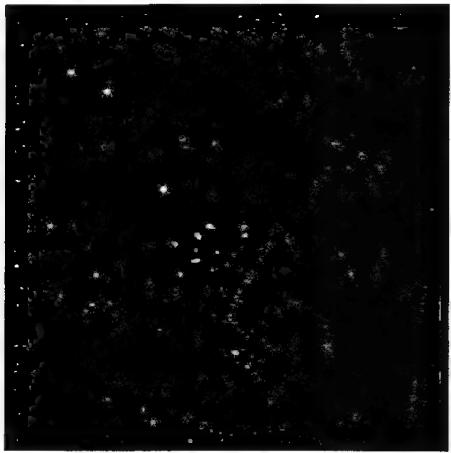
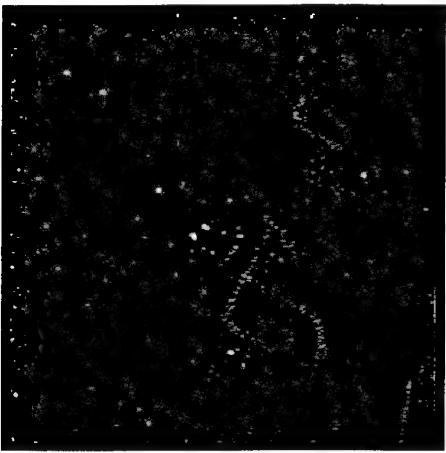
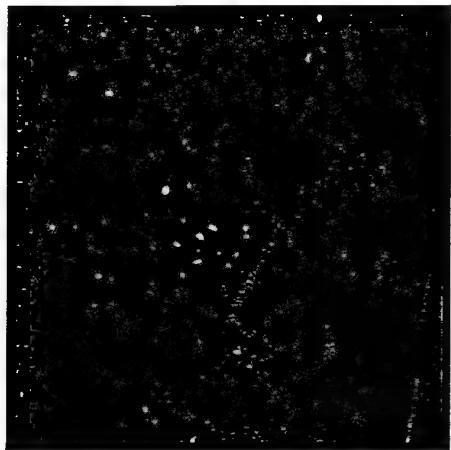
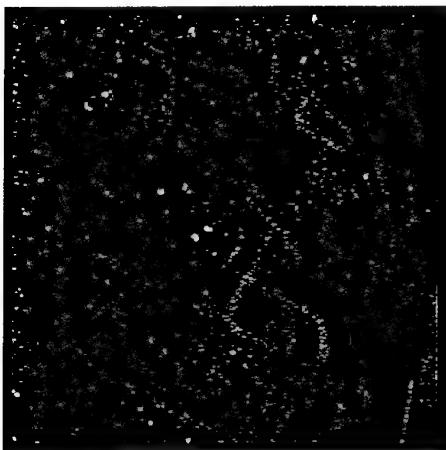
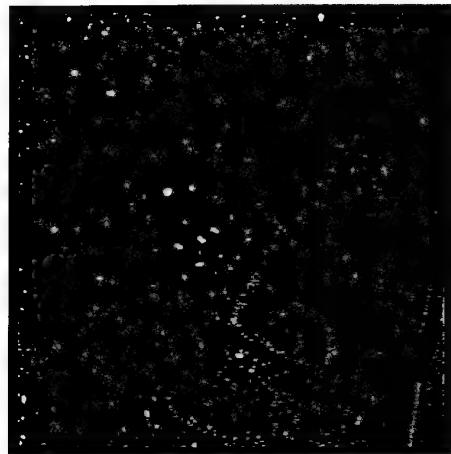
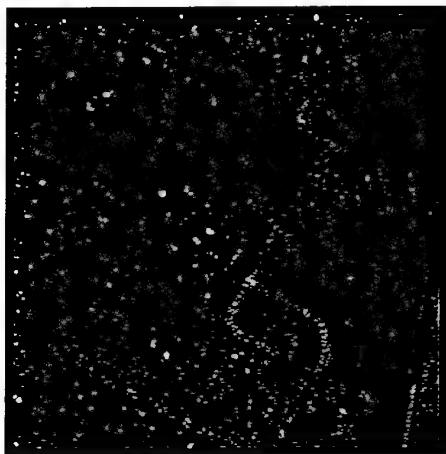


180X HH



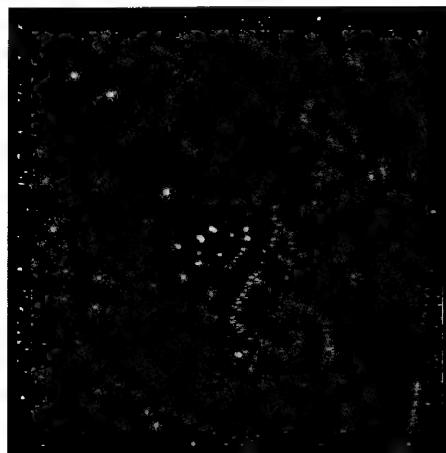
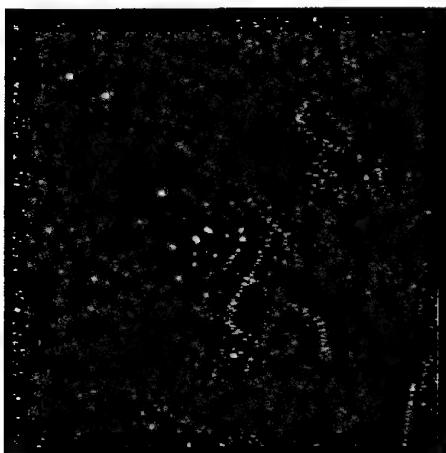
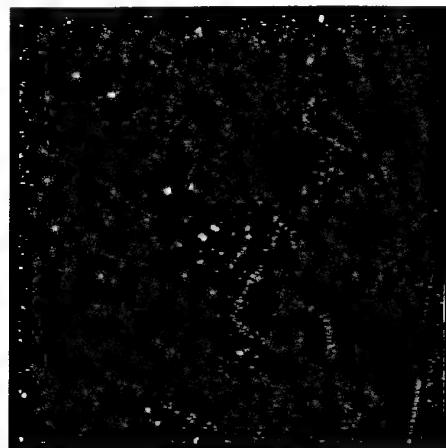
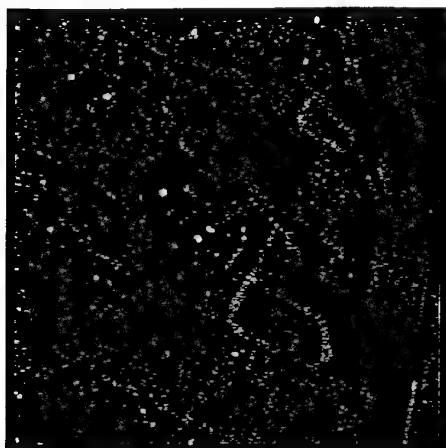
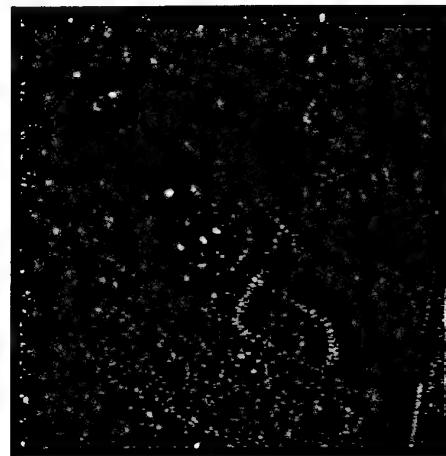
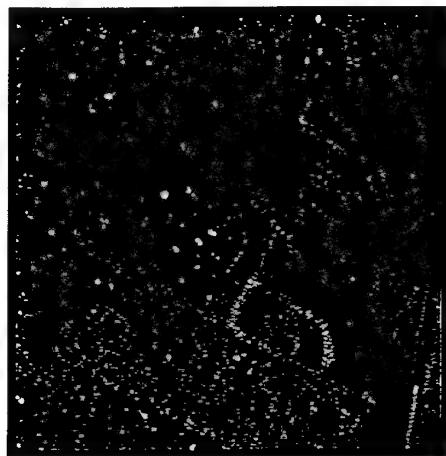
180X HV

180X VV



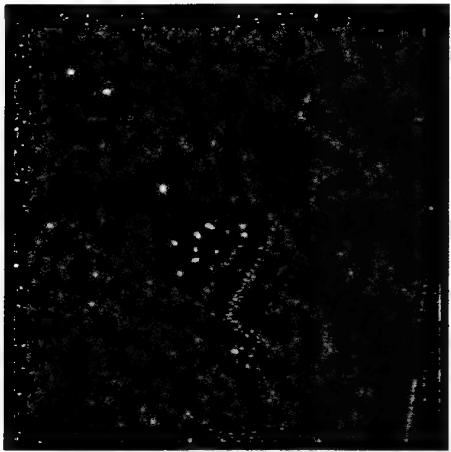
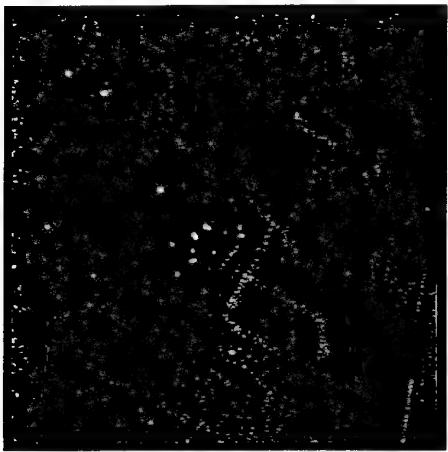
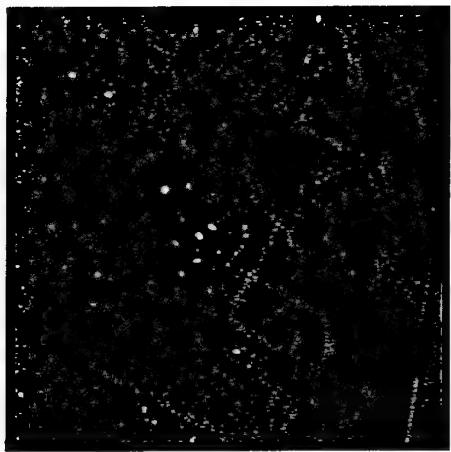
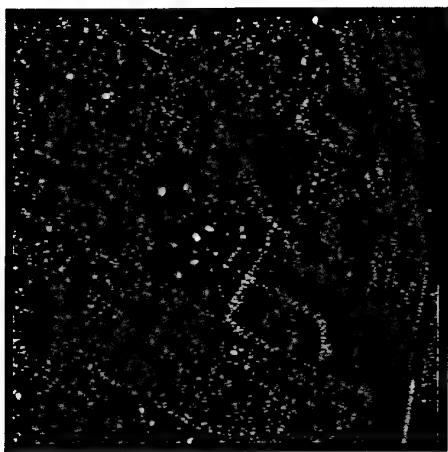
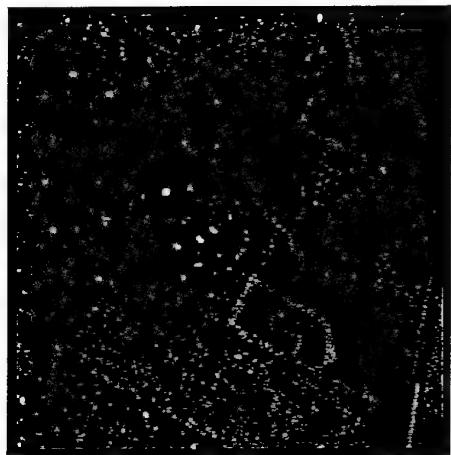
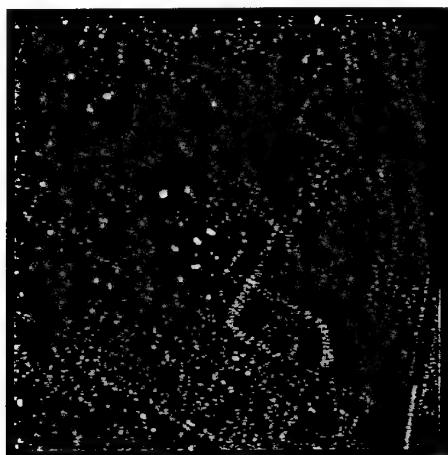
180X TRIWF

180X DIWF



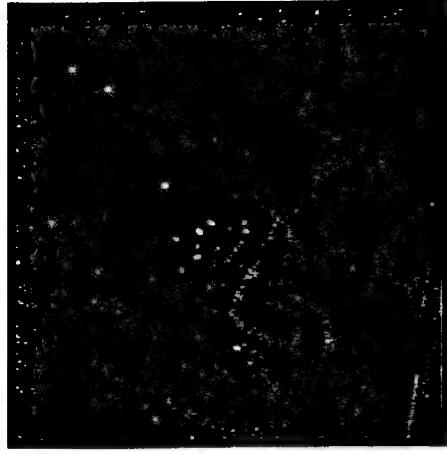
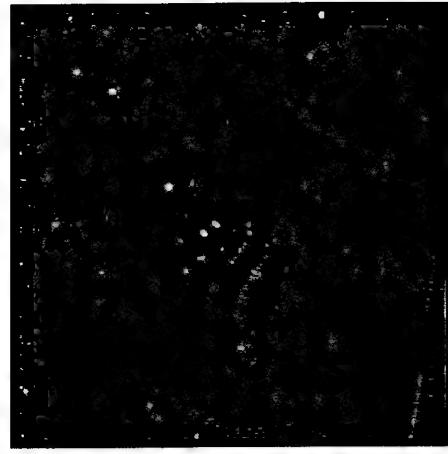
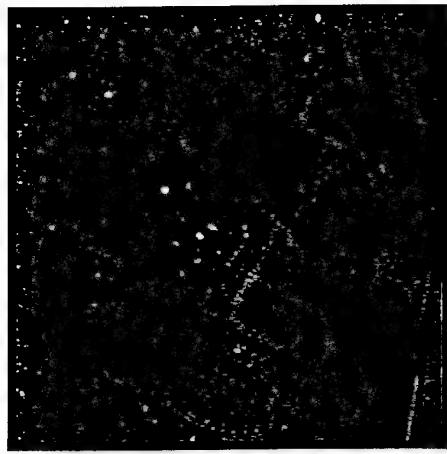
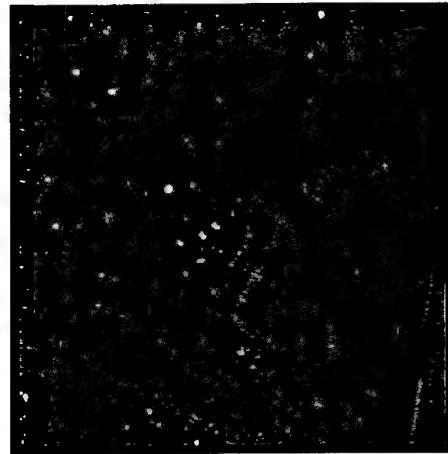
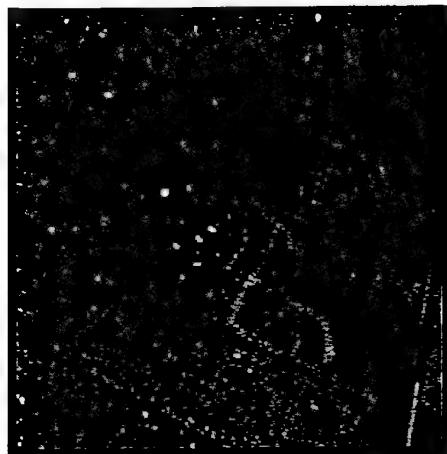
180X Dual

180X Span

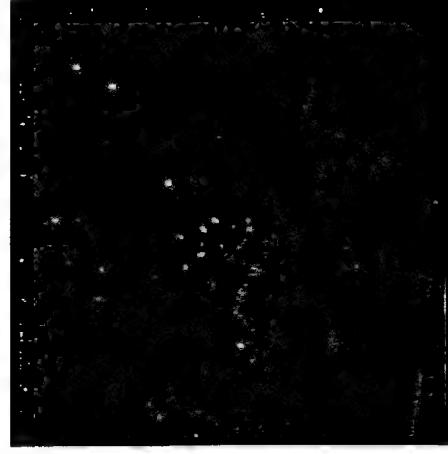


180X OIS

180X PWF

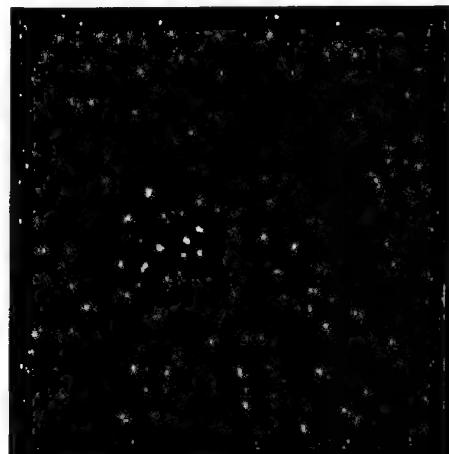


180X PWF+Wavelet 2.5 σ

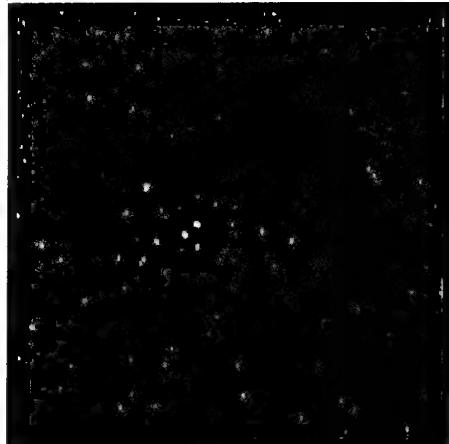


180X PWF+Wavelet 5.0 σ

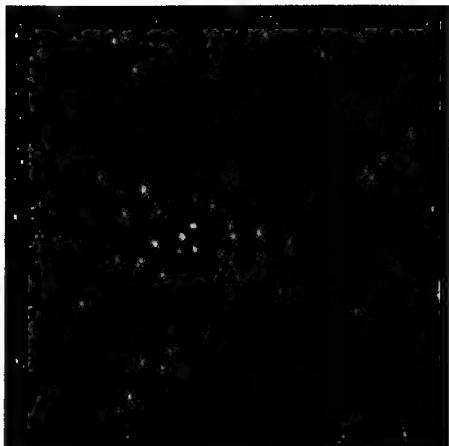
Classical CFAR



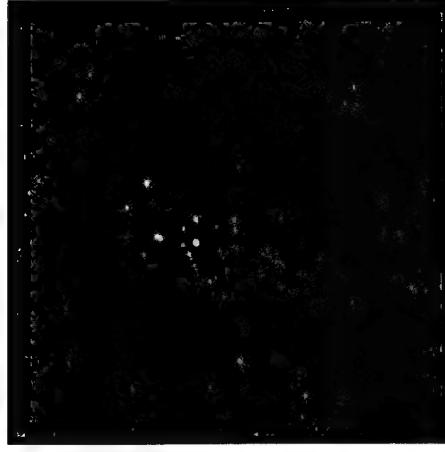
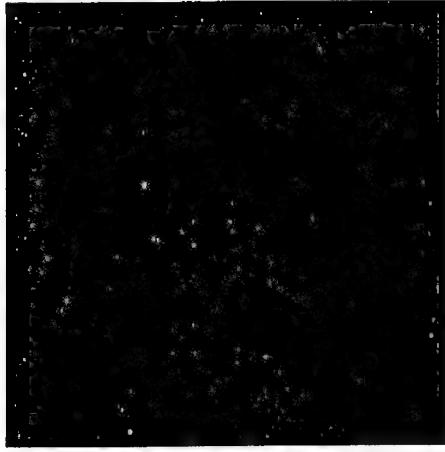
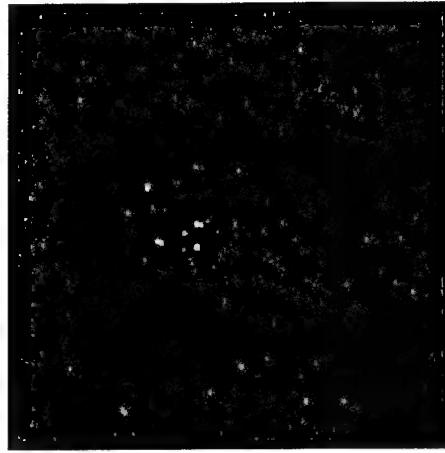
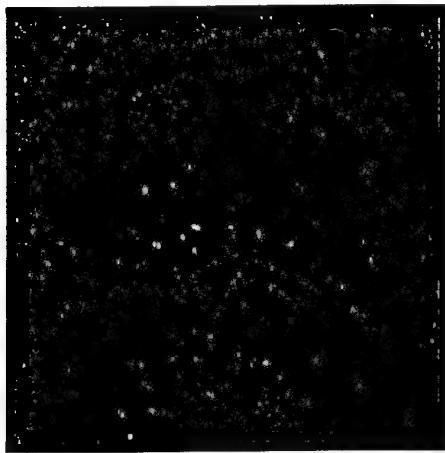
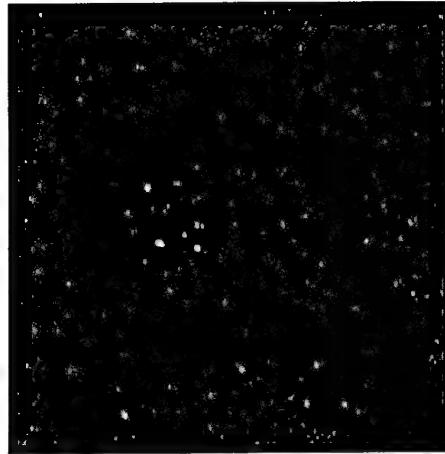
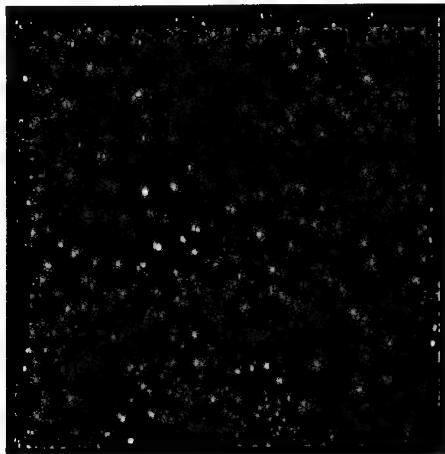
Order-statistics CFAR hollow-stencil



Order-statistics CFAR solid-stencil

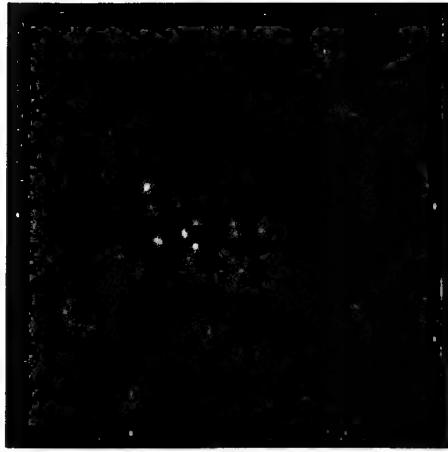
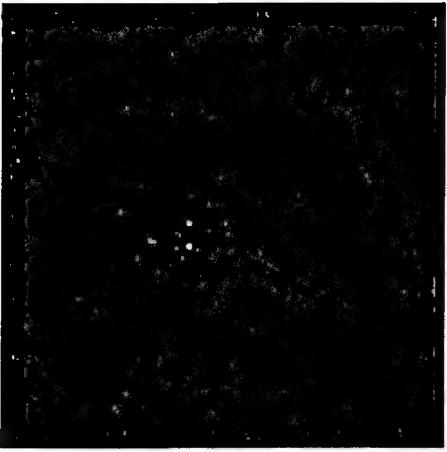
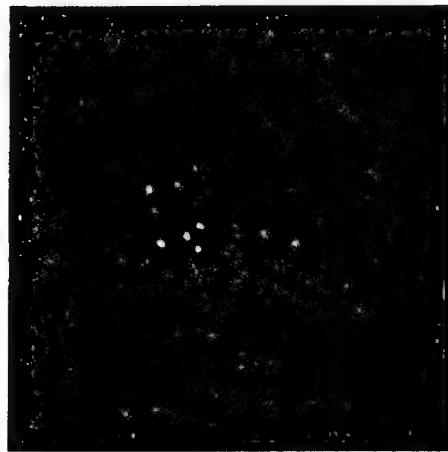
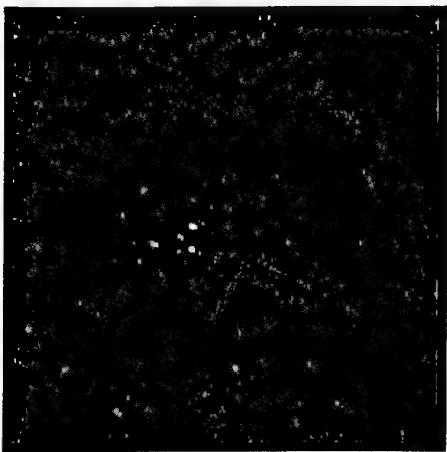
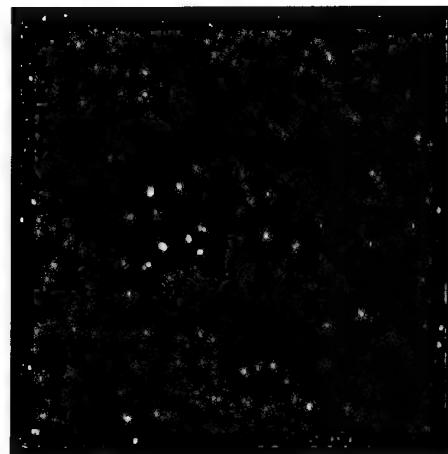
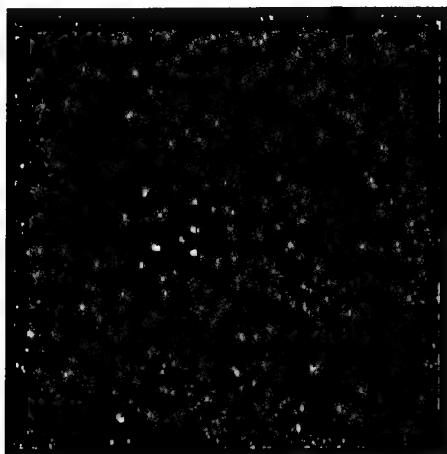


270X HH



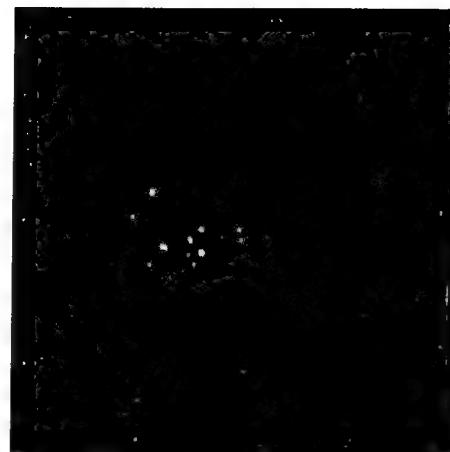
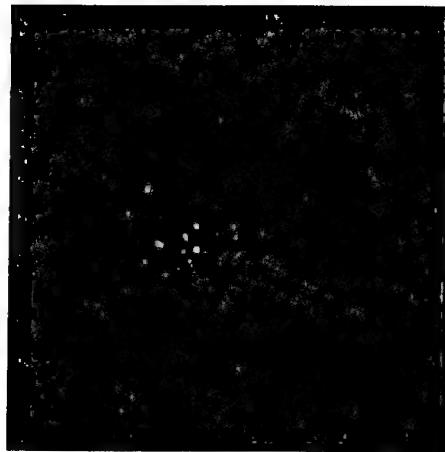
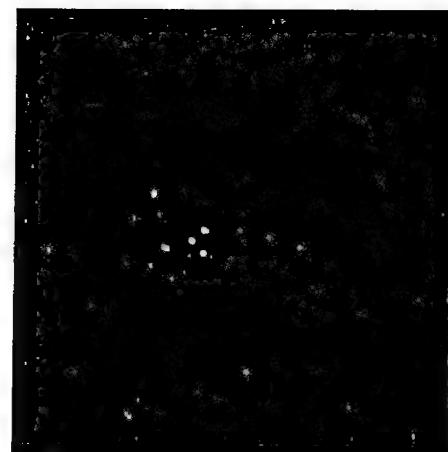
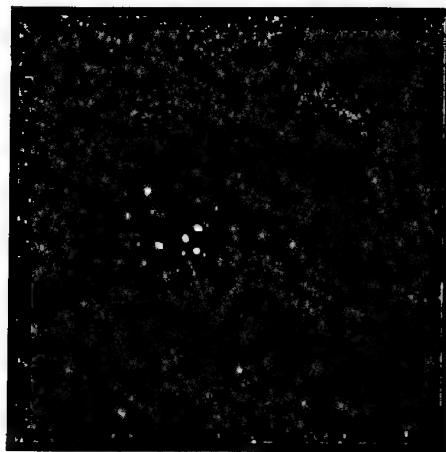
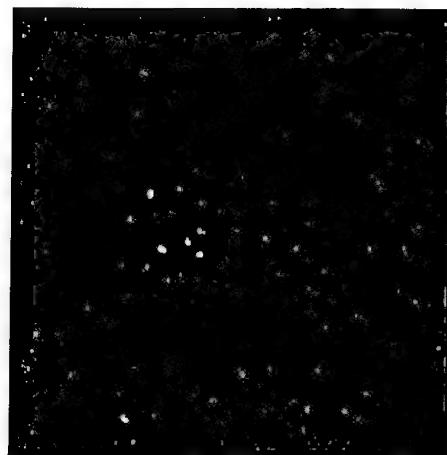
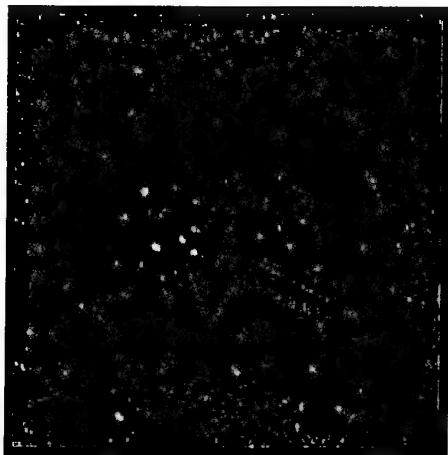
270X HV

270X VV



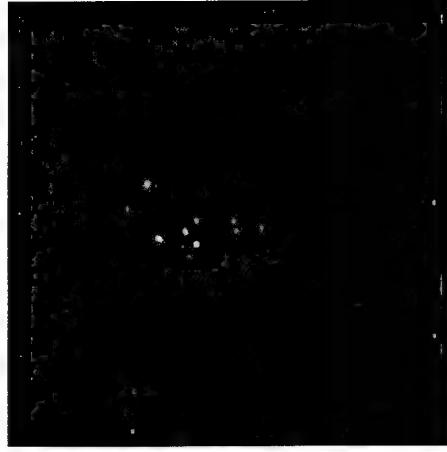
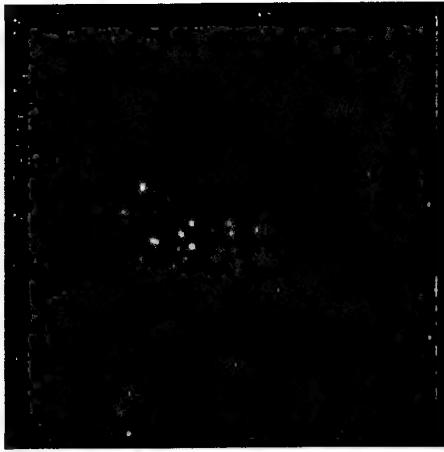
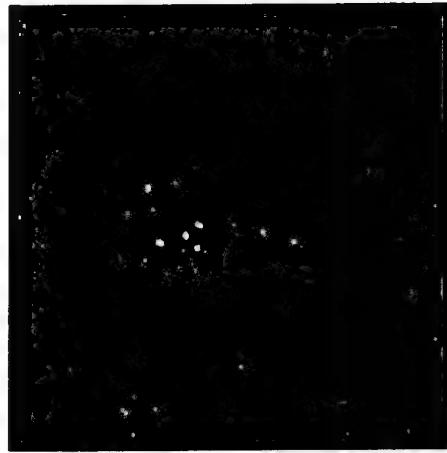
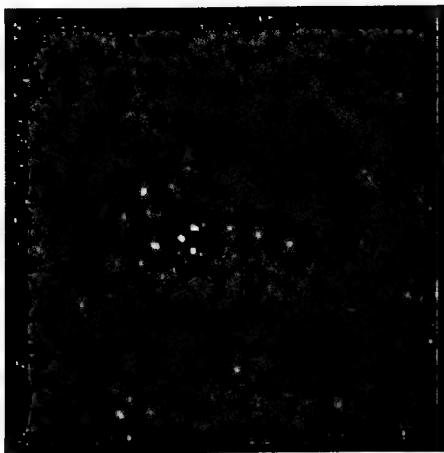
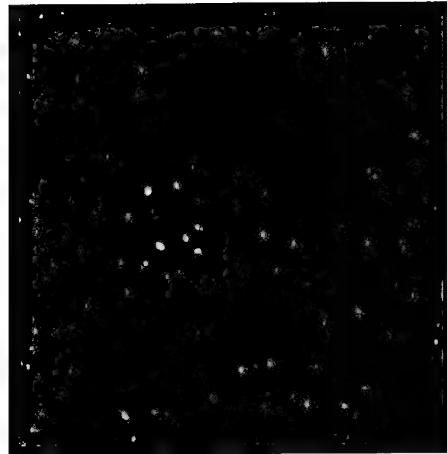
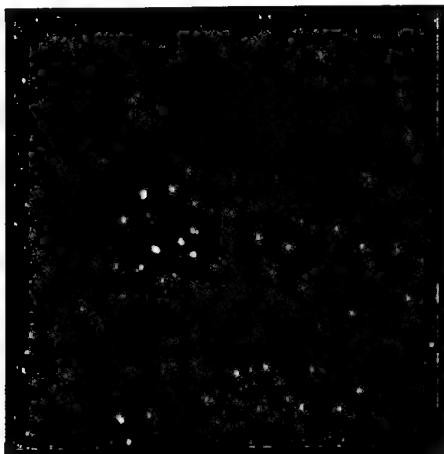
270X TRIWF

270X DIWF



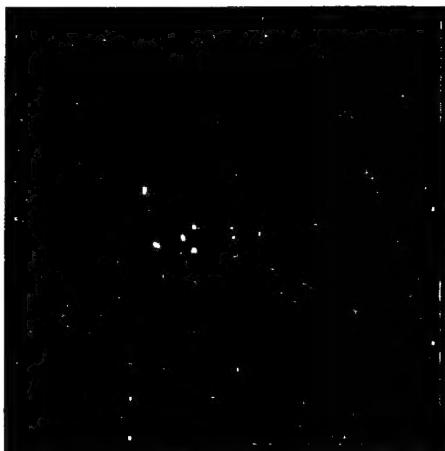
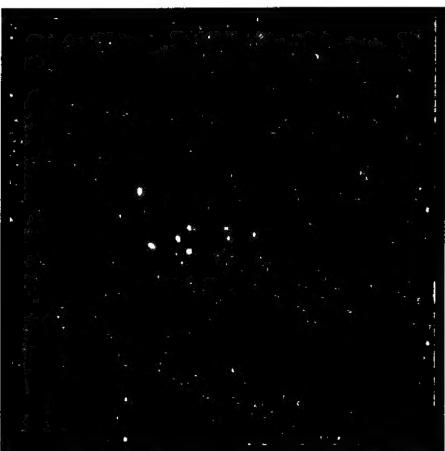
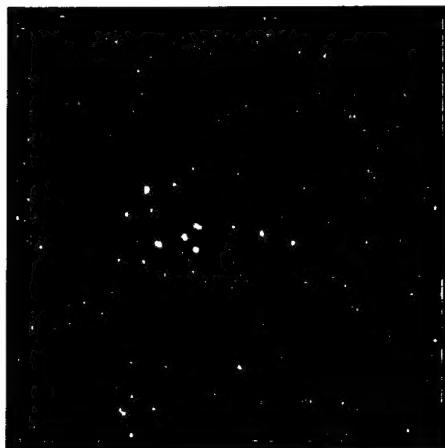
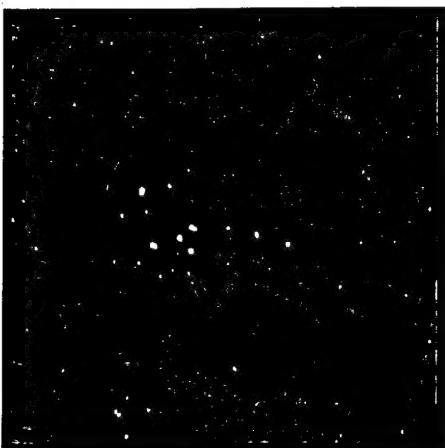
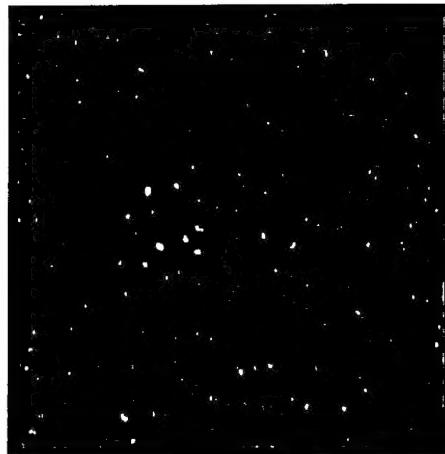
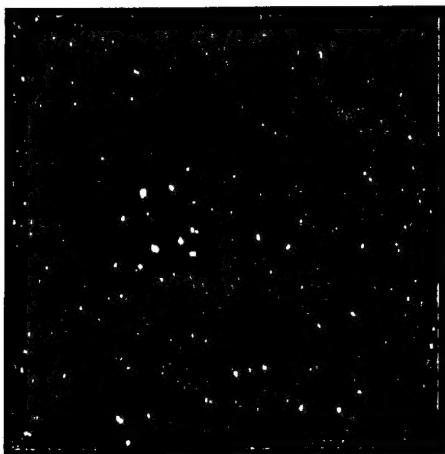
270X Dual

270X Span



270X OIS

270X PWF



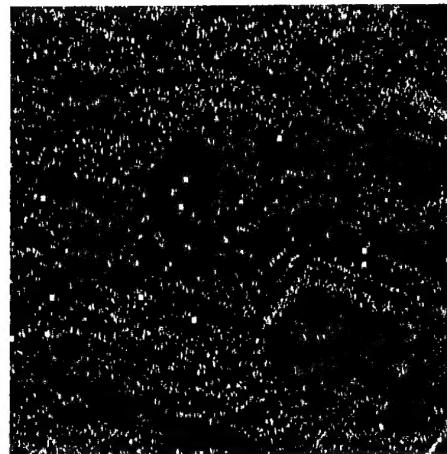
270X PWF+Wavelet 2.5 σ

270X PWF+Wavelet 5.0 σ

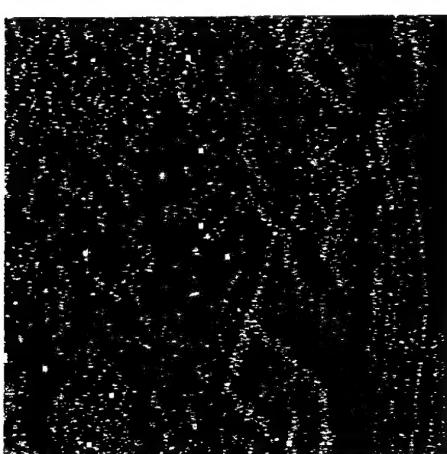
Weibull detector



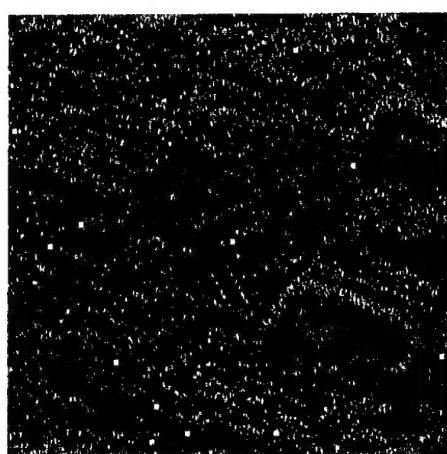
180X HH



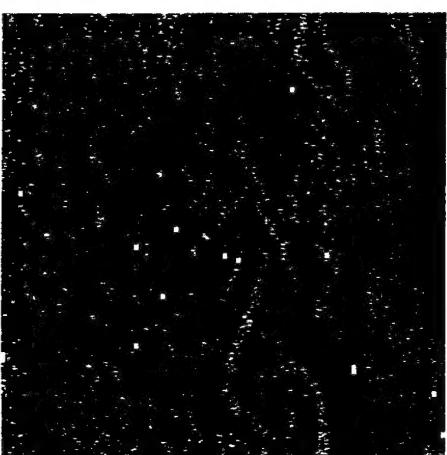
270X HH



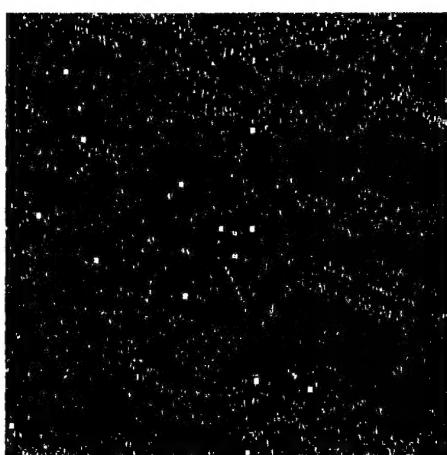
180X HV



270X HV



180X VV



270X VV

ONGERUBRICEERD
REPORT DOCUMENTATION PAGE
(MOD-NL)

1. DEFENCE REPORT NO (MOD-NL) TD98-0156	2. RECIPIENT'S ACCESSION NO	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NO FEL-98-A045
4. PROJECT/TASK/WORK UNIT NO 26425	5. CONTRACT NO -	6. REPORT DATE June 1998
7. NUMBER OF PAGES 60 (incl 3 appendices, excl RDP & distribution list)	8. NUMBER OF REFERENCES 41	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED Final
10. TITLE AND SUBTITLE Doelopsporing met PHARUS (Target detection and recognition with PHARUS)		
11. AUTHOR(S) R.J. Dekker, J.S. Groot		
12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) TNO Physics and Electronics Laboratory, PO Box 96864, 2509 JG The Hague, The Netherlands Oude Waalsdorperweg 63, The Hague, The Netherlands		
13. SPONSORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES) DS/CZ-D PO Box 20701, 2500 ES The Hague, The Netherlands		
14. SUPPLEMENTARY NOTES The classification designation Ongerubriceerd is equivalent to Unclassified, Stg. Confidentieel is equivalent to Confidential and Stg. Geheim is equivalent to Secret.		
15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS (1044 BYTE)) This report describes the possibility of target detection and recognition with PHARUS, a polarimetric c-band airborne SAR. A study is done to several pre-processing, detection and recognition algorithms. Pre-processing is performed to reduce the speckle noise and improve the detection probability. For this study PHARUS data was recorded during the NATO Panel 3 RSG-20 MIMEX trials at Swynnerton (UK) in October 1996, containing a set of stationary military vehicles. Detection turned out to be successful using a combination of a Polarimetric Whitening Filter (PWF) for optimal speckle reduction and an order-statistics CFAR detector. Recognition based on the spatial and polarimetric properties of the detected targets, was not possible because the resolution of PHARUS is insufficient. Because of the good detection performance, PHARUS can be used as a cue for other sensors with a good recognition performance (multi-sensor approach).		
16. DESCRIPTORS	IDENTIFIERS	
Synthetic aperture radar Polarimetry Target acquisition Target recognition	MIMEX Speckle Filters Polarimetric Whitening Filter CFAR Detectors	
17a. SECURITY CLASSIFICATION (OF REPORT) Ongerubriceerd	17b. SECURITY CLASSIFICATION (OF PAGE) Ongerubriceerd	17c. SECURITY CLASSIFICATION (OF ABSTRACT) Ongerubriceerd
18. DISTRIBUTION AVAILABILITY STATEMENT Unlimited Distribution		17d. SECURITY CLASSIFICATION (OF TITLES) Ongerubriceerd

Distributielijst

1. DWOO
2. HWO-KM*
3. HWO-KL*
4. HWO-KLu*
5. HWO-CO
6. DS/CZ-D, t.a.v. Ir. J.B.J. Orbons
7. DM&P TNO-DO
8. Directeur TNO-PML*
9. Directeur TNO-TM*
10. Accountcoördinator CO*
- 11 t/m 13. Bibliotheek KMA
14. DS/CIS, t.a.v. Lkol. H.F.J. Pols
15. DGM/IMB, t.a.v. Ing. J. Osinga
16. DMKLu/MWFAA, t.a.v. Maj. Ir. R. Thaens
17. DMKLu, t.a.v. Ir. S.J.J. de Bruin
18. DOPKLu/STAORE, t.a.v. Maj. Ir. T.W.G. de Laat
19. DMKL, t.a.v. Ing. A.J. Kramps
20. DMKL/INFO, t.a.v. Ing. F.A.J. Klein
21. DMKM/WCS/COSPON, t.a.v. Drs. W. Pelt
22. MARSTAF/OBS/OB, t.a.v. LTZ1 Ir. J. Franken
23. DMKM/WCS/EMDC, t.a.v. Ing. H. Quik
24. DMKL/T&WO, t.a.v. Ir. N. Pos
25. KMA/Vakgroep Militaire Bedrijfskunde, t.a.v. Ir. J. Rogge
26. LAS/BO/OB, t.a.v. Lkol. A. Dondorp
27. OCEDE/KCEN/MID, t.a.v. Lkol W.G.F. van Kempen
28. OCEDE/KCEN/MID, t.a.v. Maj. M. van Ommen-Kloeke
29. OCEDE/KCEN/LUA, t.a.v. Kap. R. de Vries
30. Directeur TNO-FEL
31. Adjunct-directeur TNO-FEL, daarna reserve
32. Archief TNO-FEL, in bruikleen aan MPC*
33. Archief TNO-FEL, in bruikleen aan Accountmanager CO*
34. Archief TNO-FEL, in bruikleen aan Drs. F.F. Bekkers*
35. Archief TNO-FEL, in bruikleen aan Ir. P. Hoogeboom
36. Archief TNO-FEL, in bruikleen aan Ir. C. Eberwijn
37. Archief TNO-FEL, in bruikleen aan Drs. D. van Halsema
38. Archief TNO-FEL, in bruikleen aan Dr. H. Greidanus
39. Archief TNO-FEL, in bruikleen aan Dr. A.C. van den Broek
40. Archief TNO-FEL, in bruikleen aan Ir. M.P.G. Otten
41. Archief TNO-FEL, in bruikleen aan Dr. Ir. G.J. Rijckenberg
42. Archief TNO-FEL, in bruikleen aan Ir. F.P.Ph. de Vries
43. Archief TNO-FEL, in bruikleen aan Ir. L.J. van Ewijk
44. Archief TNO-FEL, in bruikleen aan Drs. J.S. Groot
45. Archief TNO-FEL, in bruikleen aan Ing. R.J. Dekker
46. Documentatie TNO-FEL
47. Reserve

Indien binnen de krijgsmacht extra exemplaren van dit rapport worden gewenst door personen of instanties die niet op de verzendlijst voorkomen, dan dienen deze aangevraagd te worden bij het betreffende Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek of, indien het een K-opdracht betreft, bij de Directeur Wetenschappelijk Onderzoek en Ontwikkeling.

* Beperkt rapport (titelblad, managementuittreksel, RDP en distributielijst).